

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Vanja Ranogajec

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Joško Deur

Student:

Vanja Ranogajec

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Najsrdačnije se zahvaljujem voditelju rada prof. dr. sc. Jošku Deuru na prihvatanju mentorstva za ovaj rad, kao i na pružanju korisnih savjeta, te stručne pomoći pri izradi ovog rada.

Posebno se zahvaljujem i Branimiru Škugoru, mag. ing. za vođenje kroz rad i korisnim savjetima, te uloženom trudu i strpljenju kod izrade rada.

Vanja Ranogajec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	1
2. Konfiguracije hibridnih vozila.....	2
3. Model HEV pogona.....	5
3.1. Statički model transmisije.....	5
3.2. Model baterije	8
3.3. Model vozača	9
4. Upravljanje HEV pogonom	11
5. Proširenje kriterijske funkcije penalizacijskim članom	18
5.1. Penaliziranje promjene radne točke benzinskog motora – strategija 1	21
5.1.1. NEDC ciklus	21
5.1.2. UDDS ciklus	23
5.1.3. HWFET ciklus	25
5.2. Penaliziranje promjene brzine vrtnje benzinskog motora – strategija 2	27
5.2.1. NEDC ciklus	27
5.2.2. UDDS ciklus	29
5.2.3. HWFET ciklus	31
6. Niskopropusno filtriranje upravljačkih varijabli – strategija 3.....	33
6.1. NEDC ciklus	33
6.2. UDDS ciklus	35
6.3. HWFET ciklus	36
7. Usporedba rezultata	38
7.1. NEDC ciklus	40
7.2. UDDS ciklus	42
7.3. HWFET ciklus	44
8. Zaključak	46
Literatura	47
Prilozi	48

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Serijska konfiguracija hibridnog pogona.	2
Slika 2.2. Paralelna konfiguracija hibridnog pogona.	3
Slika 2.3. Serijsko-paralelna konfiguracija hibridnog pogona.	4
Slika 3.1. Toyota Prius.	5
Slika 3.2. Kinematska shema hibridnog pogona Toyote Prius.....	6
Slika 3.3. Vezni dijagram HEV s u.aznom podjelom snage.....	7
Slika 3.4. Statičke karakteristike pojedinog motora.	8
Slika 3.5. Jednostavan kvazistacionaran model baterije.....	9
Slika 3.6. Model vozača.	10
Slika 4.1. Upravljanje HEV pogonom.....	11
Slika 4.2. Regulator zasnovan na bazi pravila (RB controller).	12
Slika 4.3. Kombinacija RB i 1D-ECMS strategije.	13
Slika 4.4. Prijelaz između dviju strategija upravljanja	14
Slika 4.5. Podređeni upravljački dio.....	14
Slika 4.6. Usporedba izlaznog momenta sa i bez filtra.	15
Slika 4.7. Usporedba izlaznog momenta - uvećan detalj.....	16
Slika 4.8. Usporedba izlaznog momenta.	17
Slika 4.9. Usporedba izlaznog momenta - uvećan detalj.....	17
Slika 5.1. Usporedba realne strategije s globalno optimalnim dinamičkim programiranjem	19
Slika 5.2. Brzina vozila za NEDC ciklus.....	20
Slika 5.3. Brzina vozila za UDDS ciklus.....	20
Slika 5.4. Brzina vozila za HWFET ciklus.....	20
Slika 5.5. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.	21
Slika 5.6. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K.....	21
Slika 5.7. Usporedba potrošnje backward i forward modela.	22
Slika 5.8. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K.	22
Slika 5.9. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.	23
Slika 5.10. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K.....	23
Slika 5.11. Usporedba potrošnje backward i forward modela.	24
Slika 5.12. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K.	24

Slika 5.13. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.	25
Slika 5.14. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K.....	25
Slika 5.15. Usporedba potrošnje backward i forward modela.....	26
Slika 5.16. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K.....	26
Slika 5.17. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.	27
Slika 5.18. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K.....	27
Slika 5.19. Usporedba potrošnje backward i forward modela.....	28
Slika 5.20. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K.....	28
Slika 5.21. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.	29
Slika 5.22. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K.....	29
Slika 5.23. Usporedba potrošnje backward i forward modela.....	30
Slika 5.24. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K.....	30
Slika 5.25. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.	31
Slika 5.26. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K.....	31
Slika 5.27. Usporedba potrošnje backward i forward modela.....	32
Slika 5.28. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K.....	32
Slika 6.1. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.	33
Slika 6.2. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K.....	34
Slika 6.3. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K.....	34
Slika 6.4. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.	35
Slika 6.5. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K.....	35
Slika 6.6. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K.....	36
Slika 6.7. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.	36
Slika 6.8. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K.....	37
Slika 6.9. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K.....	37
Slika 7.1. Usporedba potrošnje za različite cikluse u ovisnosti o parametru K.....	39
Slika 7.2. Usporedba potrošnje ra različite cikluse - ograničeno područje parametra K.....	39
Slika 7.3. Usporedba SoC-a i ukupne potrošnje početne i realne strategije.....	40
Slika 7.4. Radne točke benzinskog motora.....	40
Slika 7.5. Usporedba brzina vrtnji benzinskog motora početne i realne strategije.....	41
Slika 7.6. Usporedba SoC-a i ukupne potrošnje početne i realne strategije.....	42
Slika 7.7. Radne točke benzinskog motora.....	42

Slika 7.8. Usporedba brzina vrtnji benzinskog motora početne i realne strategije.	43
Slika 7.9. Usporedba SoC-a i ukupne potrošnje početne i realne strategije.	44
Slika 7.10. Radne točke benzinskog motora.	44
Slika 7.11. Usporedba brzina vrtnji benzinskog motora početne i realne strategije.	45

POPIS TABLICA

Tablica 7.1.	Usporedba različitih strategija za NEDC ciklus.	38
Tablica 7.2.	Usporedba različitih strategija za UDDS ciklus.	38
Tablica 7.3.	Usporedba različitih strategija za HWFET ciklus.	38
Tablica 7.4.	Usporedba početne i realne strategije za NEDC ciklus.	40
Tablica 7.5.	Usporedba početne i realne strategije za UDDS ciklus.	42
Tablica 7.6.	Usporedba početne i realne strategije za HWFET ciklus.	44

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
τ_e	Nm	Moment benzinskog motora
ω_e	rad/s	Brzina vrtnje benzinskog motora
τ_{mg1}	Nm	Moment stroja M/G ₁
ω_{mg1}	rad/s	Brzina vrtnje stroja M/G ₁
τ_{mg2}	Nm	Moment stroja M/G ₂
ω_{mg2}	rad/s	Brzina vrtnje stroja M/G ₂
h	-	Prijenosni omjer planetarnog prijenosnika
i_0	-	Završni prijenosni omjer
τ_{cd}	Nm	Izlazni moment planetarnog prijenosnika
ω_{cd}	rad/s	Izlazna brzina vrtnje planetarnog prijenosnika
SoC	%	Stanje napunjenosti baterije
U_{oc}	V	Napon baterije
i	A	Struja baterije
R	Ω	Unutarnji otpor baterije
Q_{max}	F	Kapacitet punjenja baterije
P_{batt}	W	Snaga baterije
η_{mg1}	%	Stupanj korisnosti stroja M/G ₁
η_{mg2}	%	Stupanj korisnosti stroja M/G ₂
τ_{mg1max}	Nm	Maksimalni moment stroja M/G ₁
τ_{mg2max}	Nm	Maksimalni moment stroja M/G ₂
\dot{m}_{eq}	g/s	Ekvivalentni maseni tok goriva
\dot{m}_{fuel}	g/s	Stvarni maseni tok goriva iz benzinskog motora
\dot{m}_{batt}	g/s	Fiktivni maseni tok goriva u/iz baterije
τ_{mg1R}	Nm	Referentni iznos momenta stroja M/G ₁
τ_{mg2R}	Nm	Referentni iznos momenta stroja M/G ₂
τ_{eR}	Nm	Referentni iznos momenta benzinskog motora
ω_{eR}	rad/s	Referentna brzina vrtnje benzinskog motora
T_f	s	Vremenska konstanta filtra

SAŽETAK

U radu su uvodno prikazane temeljne konfiguracije hibridnih električnih vozila. Zatim je postavljen model široko korištenog serijsko-paralelnog hibridnog vozila koji je u radu korišten za potrebe računalnih simulacija. Opisan je sustav upravljanja pogonom hibridnog vozila temeljen na kombiniranju regulatora zasnovanog na bazi pravila i trenutačnoj minimizaciji ekvivalentne potrošnje goriva. Temeljni cilj rada je poboljšanje kvalitete prijelaznih pojava u pogonu hibridnog vozila, te je stoga kriterijska funkcija algoritma minimizacije potrošnje goriva dodatno proširena penalizacijskim članom s ciljem smanjenja utjecaja varijacija upravljačkih varijabli. Usporedno je analizirana mogućnost poboljšanja prijelaznih pojava primjenom niskopropusnog filtriranja upravljačkih varijabli. Simulacijske analize provedene su na tri certifikacijska vozna ciklusa, te su potvrdile učinkovitost predloženog proširenja upravljačke strategije u smislu mirnijeg rada pogona i smanjene potrošnje goriva.

Ključne riječi: hibridno električno vozilo, upravljanje, prijelazne pojave, optimiranje, potrošnja goriva, računalne simulacije

1. UVOD

Hibridnim vozilom nazivamo svako vozilo koje za svoj pogon koristi više od jednog izvora snage. Ono u svojoj strukturi sadrži minimalno dva motora od kojih je jedan uobičajeno motor s unutarnjim izgaranjem, a drugi elektromotor ili hidraulički motor. Zbog toga je hibridno vozilo složeni sustav koji omogućuje da pojedine komponente pogona rade u najpovoljnijem režimu rada, odnosno s najvišom korisnošću, te je time omogućena značajna ušteda goriva kao i smanjena emisija štetnih plinova.

Većina postupaka optimiranja upravljanja pogonom hibridnih vozila kao glavni kriterij kvalitete uzimaju minimizaciju potrošnje goriva. Međutim, u realnim hibridnim pogonima dolazi do učestalih varijacija upravljačkih varijabli što može dovesti do povećanja potrošnje energije u dinamičkim stanjima, te istovremenog smanjenja kvalitete vožnje. Cilj ovog rada je razmotriti strategije za smanjenje varijacija upravljačkih varijabli, a samim time i povećanja kvalitete vožnje te potencijalno i smanjenja potrošnje goriva.

U uvodnim poglavljima opisat će se princip rada, modeliranje i upravljanje hibridnim električnim vozilima s naglaskom na serijsko–paralelnu konfiguraciju hibridnog pogona kakva se susreće u vozilima marki Toyota Prius i Ford Escape. Potom će se prikazati glavni dio rada koji se odnosi na prijedlog i provedbu unaprjeđenja strategije upravljanja hibridnim vozilom u smislu potiskivanja naglašenih prijelaznih pojava temeljnih pogonskih varijabli. Učinak predloženog proširenja upravljačke strategije na mirnoću rada pogona i potrošnju goriva ispitati će računalnim simulacijama.

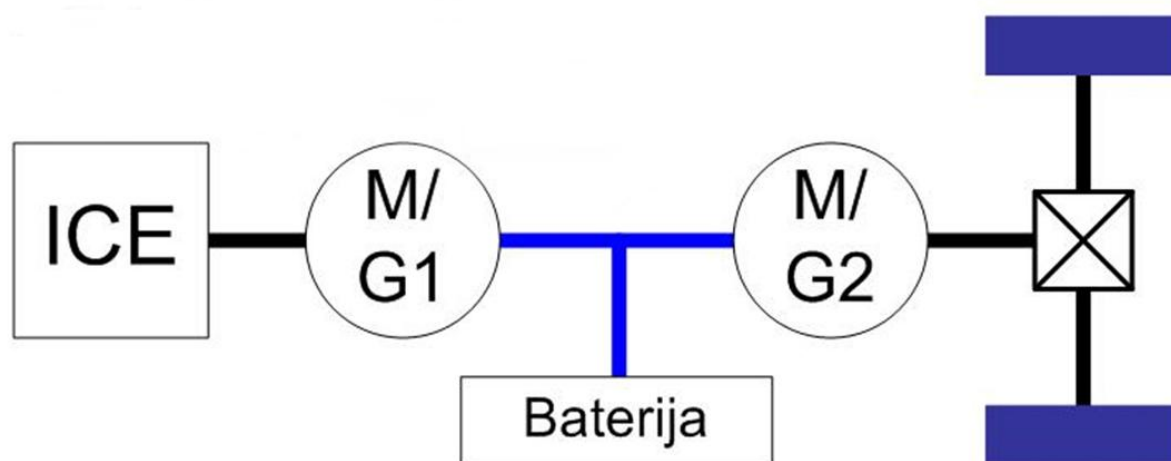
2. Konfiguracije hibridnih vozila

Hibridna vozila trenutačno su najzanimljivija alternativa klasičnim automobilima. Sve više proizvođača automobila nudi svoje rješenje hibridnog sustava zbog njihovih višestrukih prednosti. Glavni razlozi za uvođenje hibridnih vozila su: smanjenje zaliha nafte, porast koncentracije CO₂ u atmosferi, a samim time i povećanje srednje temperature Zemlje. Hibridna vozila značajno doprinose smanjenju CO₂, budući da ispuštaju mnogo manje štetnih plinova u odnosu na klasične automobile s motorom s unutarnjim izgaranjem pa će u predstojećim godinama sve više dobivati na značaju [1].

S obzirom na vezu mehaničkog i električnog djela, razlikuju se tri temeljne konfiguracije [2]:

- Serijska konfiguracija hibridnog pogona
- Paralelna konfiguracija hibridnog pogona
- Serijsko – paralelna konfiguracija hibridnog pogona

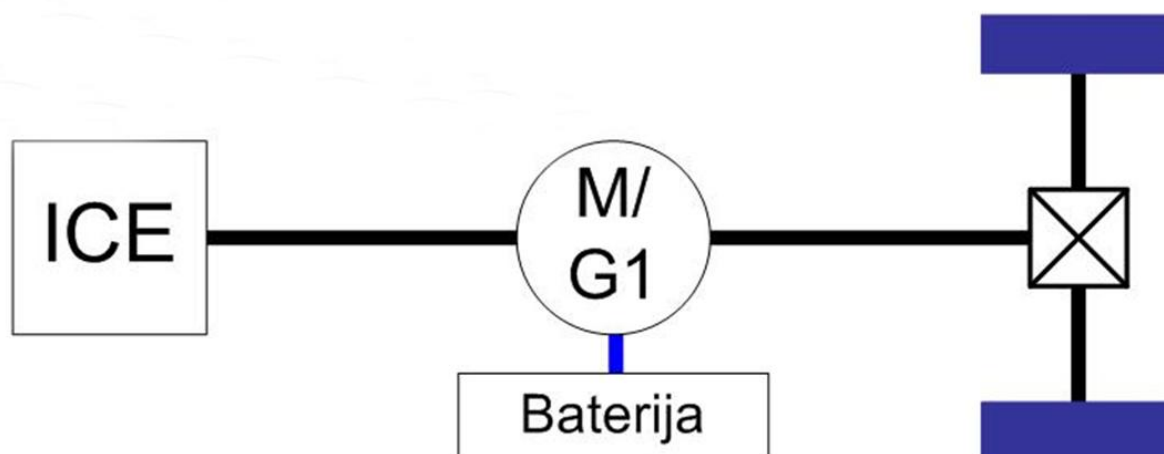
Serijska konfiguracija razvijena je tako da se običnom električnom vozilu doda relativno mali motor s unutarnjim izgaranjem koji pomoću generatora stvara električnu energiju koja se koristi za pokretanje vozila i punjenje akumulatora. Kada je opterećenje veće, te je potrebna veća snaga koju motor s unutarnjim izgaranjem ne može ostvariti, pogonskom elektromotoru dodaje se snaga iz akumulatora, a kada je opterećenje manje nadopunjuje se akumulator.



Slika 2.1. Serijska konfiguracija hibridnog pogona.

Prednosti ove konfiguracije su to što je motor s unutarnjim izgaranjem potpuno mehanički odvojen od pogonskih kotača te zbog toga može konstantno raditi u svom optimalnom području rada gdje daje najviše snage uz najmanju potrošnju. Zatim, upravljanje takvim sustavom je jednostavno jer se temelji na regulaciji brzine vrlo upravljivog elektromotora. Osim svojih prednosti, serijska struktura ima i nedostatke, a to je prvenstveno dvostruka pretvorba energije što za posljedicu ima veći gubitak energije. Osim toga potrebna su dva elektromotora te je sam pogonski elektromotor relativno velikih dimenzija jer se pomoću njega stvara moment za pogon vozila.

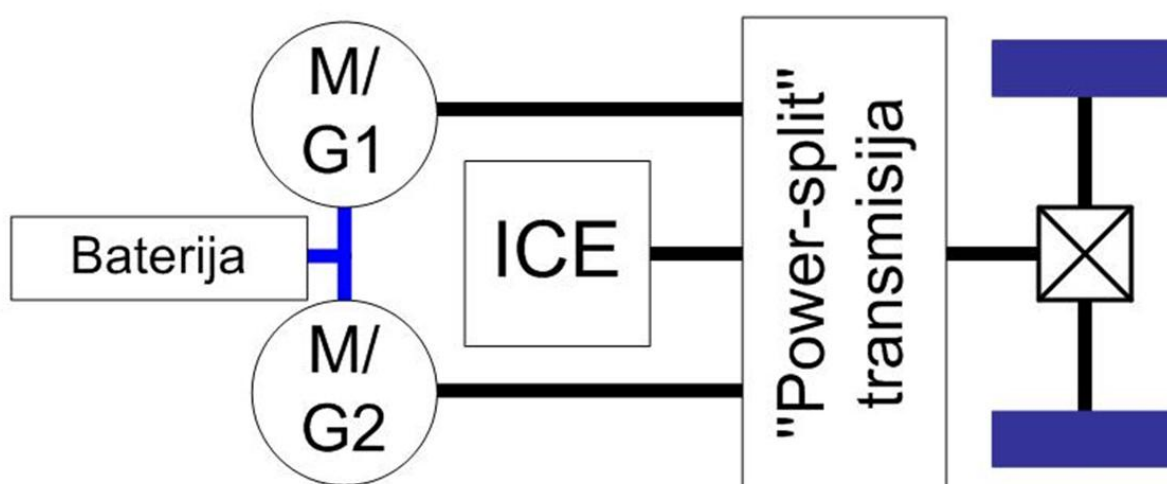
Kod paralelne konfiguracije hibridnog pogona, motor s unutarnjim izgaranjem i elektromotor preko mehaničkog “zbrajala” momenta direktno djeluju svojim ukupnim momentom na pogon vozila. Zbrajalo momenta može biti običan, ili planetarni reduktor, remenski prijenos, lančani prijenos, ili osovina na koju je montiran rotor elektromotora.



Slika 2.2. Paralelna konfiguracija hibridnog pogona.

Prednosti paralelne konfiguracije su to što motor s unutarnjim izgaranjem i elektromotor zajedno daju ukupni moment za pogon vozila, nije potrebna dodatna pretvorba energije te su gubici energije zbog toga manji. Više nisu potrebna dva elektromotora, već samo jedan koji može imati manje dimenzije pošto više nije potrebno da se cijeli pogonski moment dobiva iz njega. Glavni nedostatak je u tome što su elektromotor i motor s unutarnjim izgaranjem mehanički čvrsto spojeni s pogonom te zbog toga nije moguće da motor s unutarnjim izgaranjem radi potpuno u svom optimalnom području. Također, upravljanje tom strukturom je složenije.

Serijsko – paralelna konfiguracija pogona hibridnog vozila koristi planetarni prijenosnik za odvajanje brzine motora s unutarnjim izgaranjem od brzine na kotačima vozila pa se zbog toga brzina motora s unutarnjim izgaranjem može zadržavati u optimalnom području namještanjem brzine pojedinog elektromotora. Tok snage kod ove konfiguracije može biti serijski, ili paralelni ovisno o tome da li se tok dijeli, ili ne. Planetarni prijenosnik se zbog toga još naziva i djeliteelj snage.



Slika 2.3. Serijsko-paralelna konfiguracija hibridnog pogona.

Ova konfiguracija objedinjuje prednosti serijske i paralelne konfiguracije hibridnog pogona, međutim za razliku od paralelne konfiguracije zahtjeva dodatni elektromotor te planetarni prijenosnik što ovu konfiguraciju čini kompliciranijom. Unatoč tome, zbog svojih prednosti sve se više primjenjuje kod cestovnih vozila pa će se u nastavku detaljnije opisati struktura sustava upravljanja takvim hibridnim pogonom.

3. Model HEV pogona

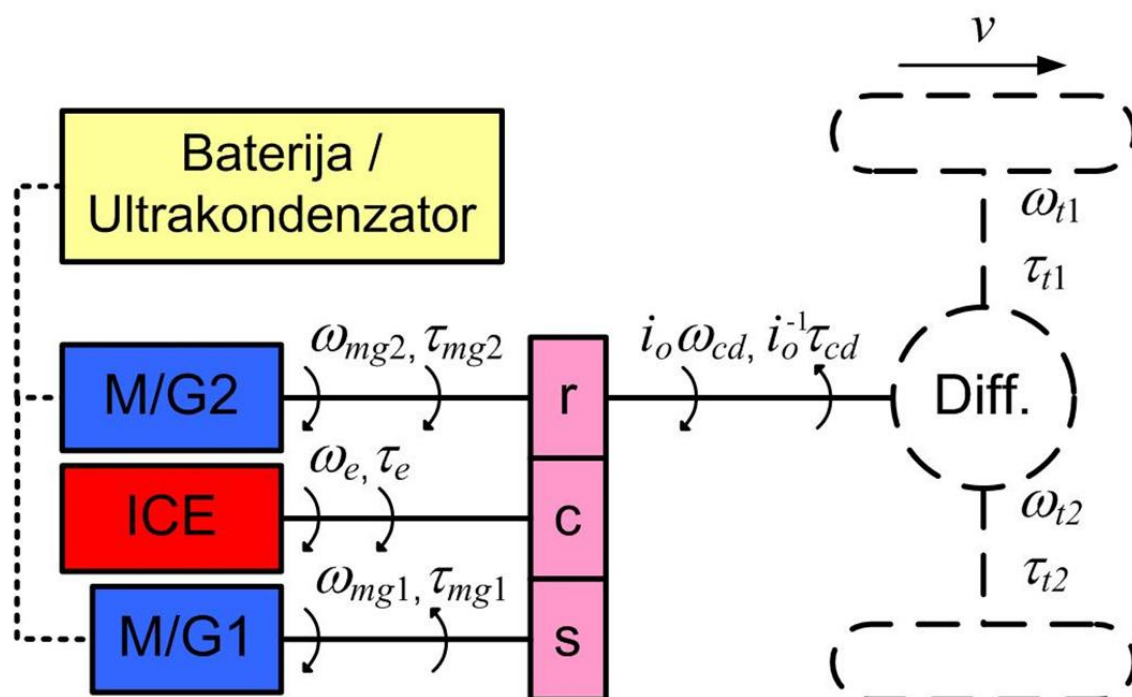
Prikazat će se model i upravljanje tipične serijsko-paralelne konfiguracije vozila temeljene na Toyota Hybrid System-u (THS). Koristit će se model koji je rađen u sklopu istraživačkog projekta i-RESEV te će se dodatno proširiti upravljački dio. Toyota Prius je električni hibridni automobil razvijen i proizveden u Japanu 1997. To je bio početak prve masovne proizvodnje hibridnih automobila u svijetu. Takav hibridni sustav poznat je pod nazivom "Hybrid Synergy Drive" (HSD), što predstavlja sustav koji inteligentno koristi dva električna stroja i motor s unutarnjim izgaranjem kako bi se osigurala najveća moguća učinkovitost.



Slika 3.1. Toyota Prius.

3.1. Statički model transmisije

Kinematska shema HEV s ulaznom podjelom snage (Slika 3.2.) prikazuje pogonski elektromotor (M/G_2) koji pogoni prsten planetarnog prijenosnika (r). Nadalje, prsten planetarnog prijenosnika je spojen preko reduktora i diferencijala s pogonskim kotačima. Motor s unutarnjim izgaranjem (ICE) je povezan sa nosačem planetarnog prijenosnika (c), a generator (M/G_1) je povezan sa sunčanikom (s).

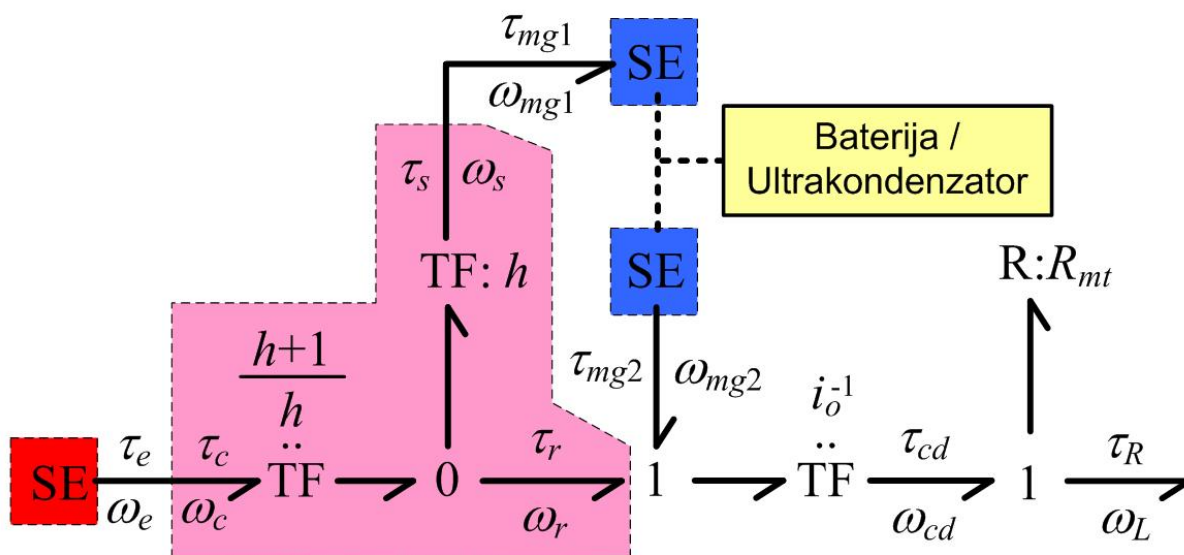


Slika 3.2. Kinematska shema hibridnog pogona Toyote Prius.

Slika 3.3. prikazuje vezni dijagram hibridnog pogona [3]. Metoda veznih dijagrama (engl. Bond Graph Method) je jednostavna i pregledna metoda za prikazivanje i matematičko opisivanje složenih fizikalnih sustava. Osnovna zamisao je prikazati fizikalni sustav u obliku dijagrama koji se sastoji od skupa unaprijed definiranih standardnih elemenata, čiji raspored odgovara fizičkom ustroju danog fizikalnog sustava i pomoću kojih se opisuje tok i raspodjela snage među elementima sustava. Metoda je preglednija od sustava matematičkih izraza, ili blokovskih dijagrama i pruža jasniji uvid u odnose među elementima sustava.

Glavni element je veza (engl. bond) prikazana polustrelicom i oznakama T za moment, što predstavlja napor (engl. effort) i ω za kutnu brzinu koja predstavlja tok (engl. flow). Veza predstavlja prijenos (i smjer) snage kroz odgovarajući dio mehaničkog sustava. Čvor **1** predstavlja grananje snage u dijelu mehaničkog sustava gdje je tok konstantan što je u ovom slučaju kutna brzina. Prema tome, čvor **1** predstavlja grananje okretnog momenta. Čvor **0** predstavlja grananje snage u dijelu mehaničkog sustava gdje je napor konstantan što je u ovom slučaju okretni moment. Prema tome, čvor **0** predstavlja grananje kutne brzine. Transformacijski element **TF** opisuje transformaciju toka i napora bez gubitaka pa je snaga na ulazu u element jednaka snazi na izlazu iz elementa. Element otpora **R** opisuje elemente gdje

se snaga rasipa (troši). U mehaničkim sustavima opisuje tarne i prigušne elemente poput trenja u ležajevima, spojkama i gumama. Elementi **SE** i **SF** su elementi izvora. Ovisno o tome koja je vrijednost fizikalne veličine kod izvora konstantna govori se o **SE** izvoru napora, ili **SF** izvoru toka.



Slika 3.3. Vezni dijagram HEV s u.aznom podjelom snage.

Konačno, na temelju veznog dijagrama HEV dobivaju se sljedeće kinematske jednadžbe pogona:

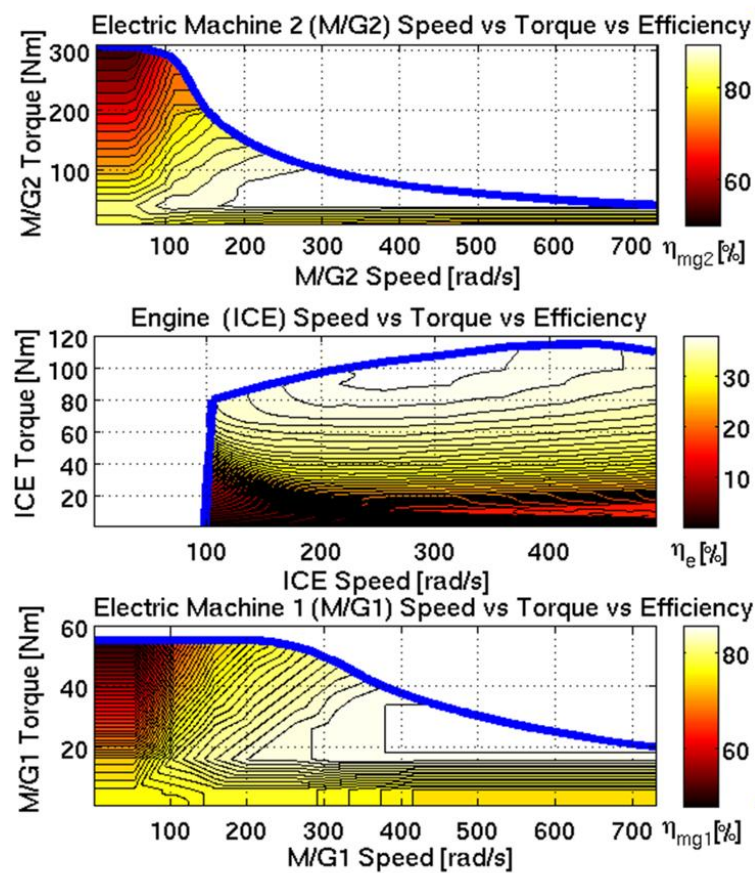
$$\tau_e = (h + 1)\tau_{mq1} \quad (1)$$

$$\omega_{mq1} = (h+1)\omega_e - h\omega_{mq2} \quad (2)$$

$$\omega_{cd} = \omega_{mq2}/i_0 \quad (3)$$

$$\tau_{cd} = i_0(\tau_{mq2} + h(h+1)^{-1}\tau_e) \quad (4)$$

Pri čemu je h prijenosni omjer planetarnog prijenosnika, a i_0 ukupni prijenosni omjer reduktora i diferencijala. Slika 3.4. prikazuje statičke karakteristike pojedinog motora.



Slika 3.4. Statičke karakteristike pojedinog motora.

3.2. Model baterije

Slika 3.5. prikazuje jednostavan kvazistacionaran model baterije [4]. Slika također prikazuje nelinearnu ovisnost napona U_{oc} o stanju napunjenosti baterije (SoC). Za ovu primjenu, unutarnji otpor baterije R ovisi samo o načinu rada baterije ($R = R_{ic}$ za punjenje i $R = R_{idc}$ za pražnjenje). Stanje napunjenosti baterije SoC ovisi o struji baterije i te o kapacitetu punjenja Q_{max} :

$$\frac{dSoC}{dt} = -\frac{i(t)}{Q_{max}}, \quad (5)$$

dok je snaga baterije dana sljedećim izrazom:

$$P_{batt} = U_{oc}(SoC)i(t) - R(SoC, i)i^2(t). \quad (6)$$

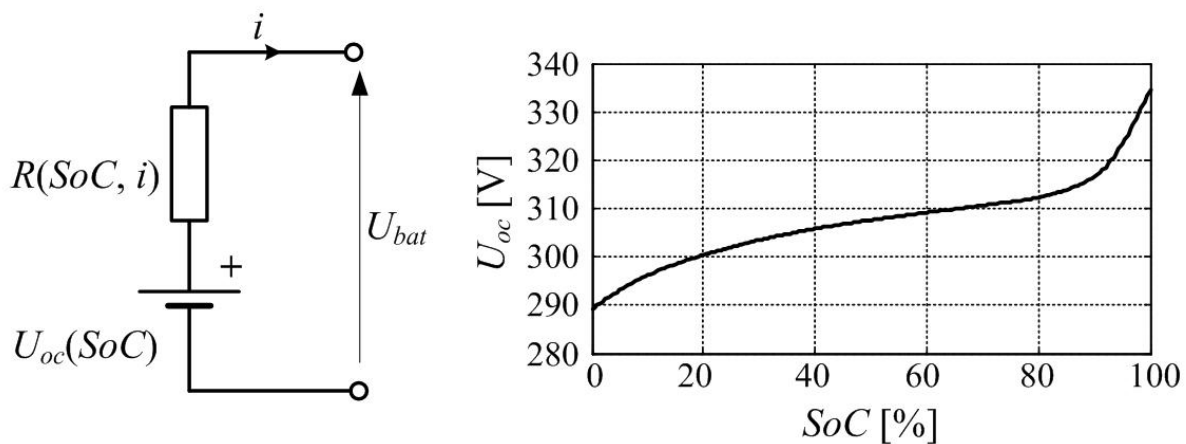
Koristeći izraze (5) i (6), konačno se dobiva izraz koji se može koristiti kao model baterije:

$$\frac{dSoC}{dt} = \frac{\sqrt{U_{oc}^2(SoC) - 4R(SoC, i)P_{batt}} - U_{oc}}{2Q_{max}R(SoC, i)}, \quad (7)$$

pri čemu se snaga baterije (P_{batt}) računa na sljedeći način:

$$P_{batt} = \eta_{mg2}^{k_2} \omega_{mg2} \tau_{mg2} - \eta_{mg1}^{k_1} \omega_{mg1} \tau_{mg1}. \quad (8)$$

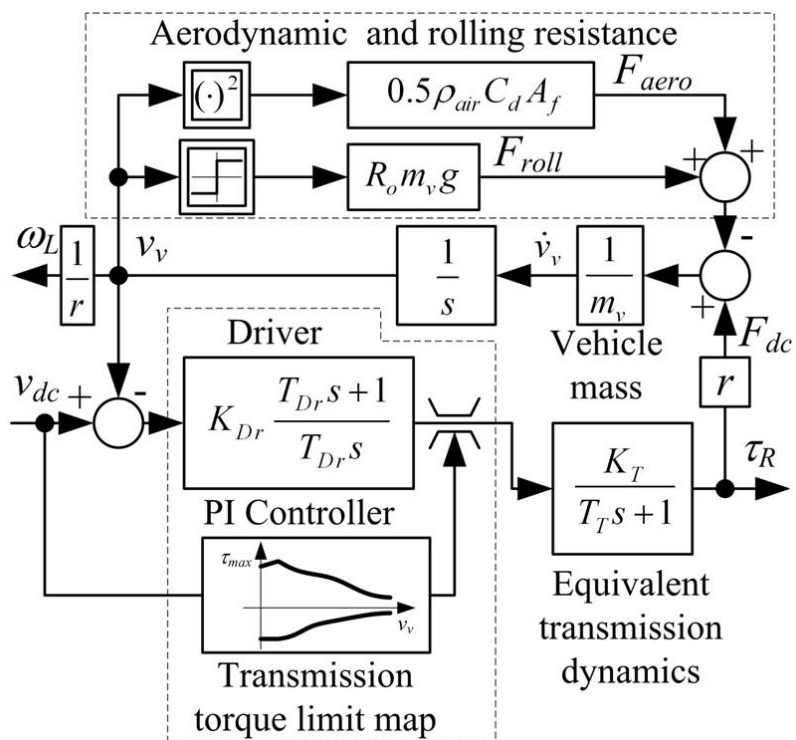
Koeficijenti k_1 i k_2 jednaki su -1 ukoliko električni strojevi rade kao motori, dok su 1 kada električni strojevi rade u generatorskom načinu rada.



Slika 3.5. Jednostavan kvazistacionaran model baterije.

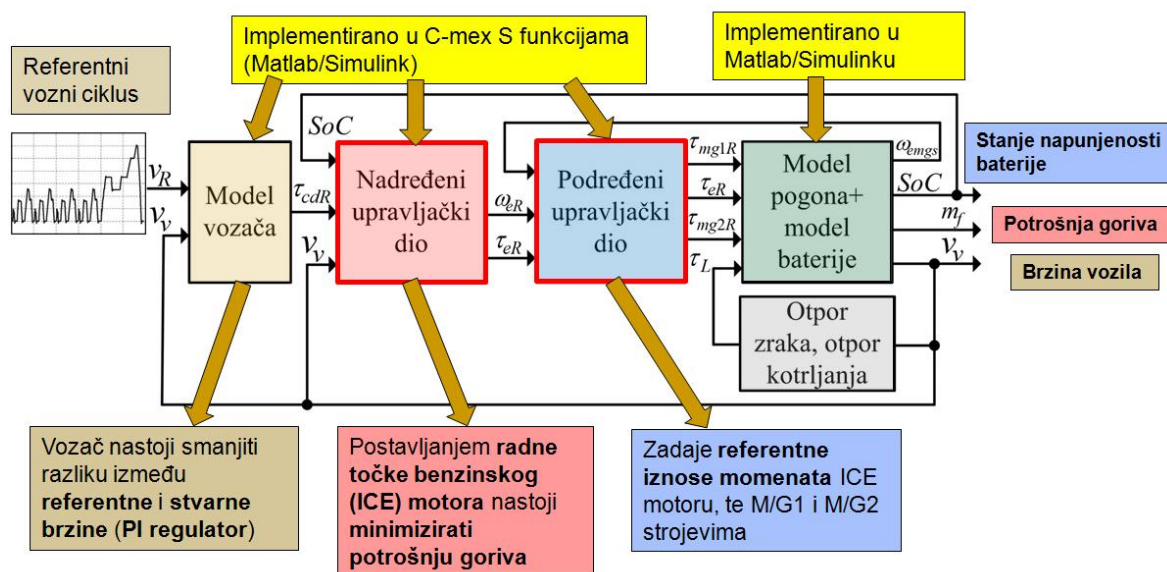
3.3. Model vozača

Model vozača odnosi se na “virtualni” PI regulator brzine vozila. Uvodi se kako bi se dala komanda za potreban izlazni moment τ_{cdR} kako bi se postigla željena brzina vozila v_{dc} . Željena brzina vozila dobiva se iz certificiranih voznih ciklusa. Slika 3.6. prikazuje model vozača.



Slika 3.6. Model vozača.

4. Upravljanje HEV pogonom

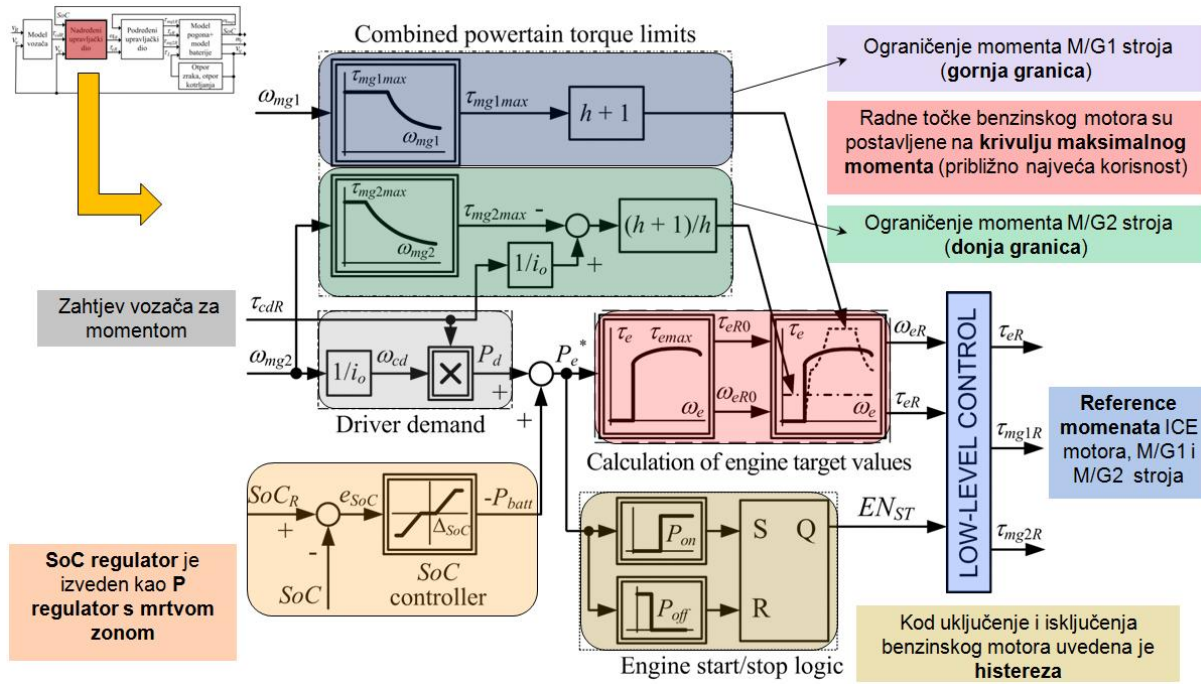


Slika 4.1. Upravljanje HEV pogonom.

U serijsko-paralelnoj konfiguraciji hibridnog pogona izlazni moment se stvara pomoću motora s unutarnjim izgaranjem ili pomoću M/G_2 stroja, dok se u isto vrijeme neovisno može mijenjati brzina vrtnje benzinskog motora pomoću stroja M/G_1 [4]. Time je omogućeno držanje benzinskog motora u optimalnom području (području optimalne potrošnje) koje se nalazi oko krivulje maksimalnog momenta motora (Slika 3.4.). Upravljanje je tipično riješeno s takozvanim RB (engl. rule-based) regulatorom gdje se radna točka motora određuje s obzirom na zahtjev vozača i zahtjev snage baterije. Slika 4.2. prikazuje regulator zasnovan na bazi pravila (RB controller). Regulator koristi zahtjev za snagom vozača i zahtjev za snagom baterije i na temelju toga određuje potrebnu snagu benzinskog motora. On određuje zahtjev momenta motora i brzine vrtnje motora na temelju toga da motor radi u području oko krivulje maksimalnog momenta kako bi potrošnja bila minimalna. RB regulator također obuhvaća tipičnu start/stop logiku pri čemu se benzinski motor gasi kad su zahtjevi snage mali i time se sprječava rad motora na malim snagama (smanjena efikasnost motora), dok se ponovno uključuje kad se traži veća snaga (povećan zahtjev vozača za snagom, ili *SoC* regulator traži punjenje baterije). Pošto za strojeve M/G_1 i M/G_2 postoje ograničenja momenta koje mogu postići (posebice na velikim brzinama vrtnje) komanda za moment benzinskog motora mora zadovoljiti sljedeće uvjete:

$$\tau_e \leq (h + 1)\tau_{mg1max}(\omega_{mg1}) \quad (9)$$

$$\tau_e \geq (h + 1)(hi_0)^{-1}\tau_{cd} - (h + 1)h^{-1}\tau_{mg2max}(\omega_{mg2}) \quad (10)$$



Slika 4.2. Regulator zasnovan na bazi pravila (RB controller).

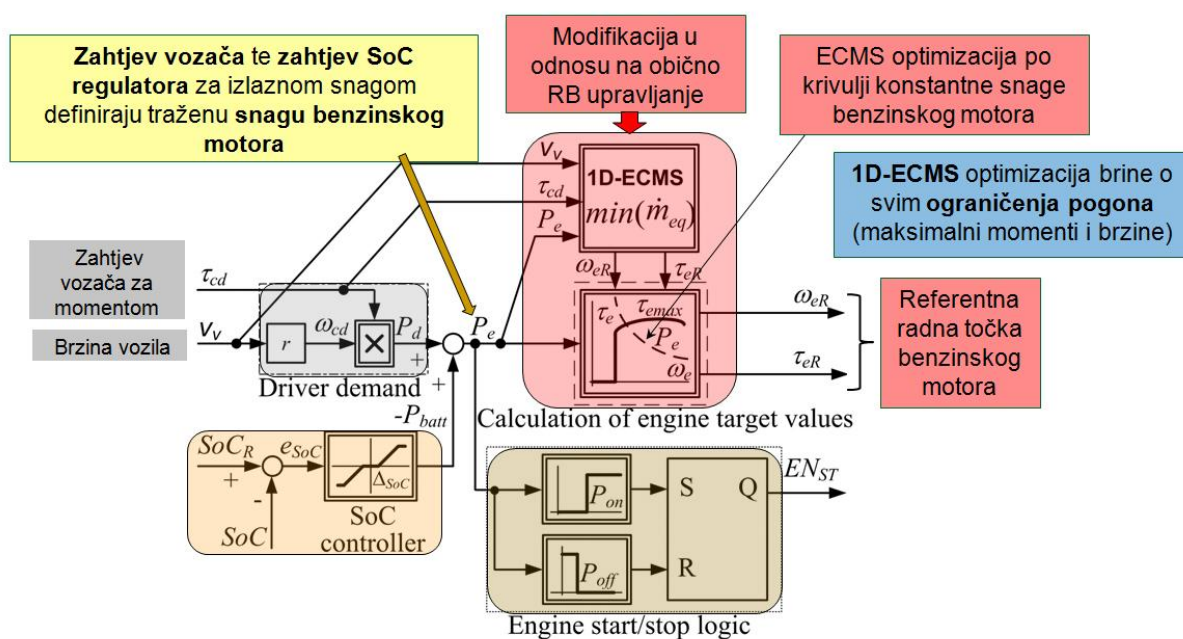
Kako bi se dodatno smanjila potrošnja goriva hibridnog električnog vozila, RB upravljački sustav proširuje se strategijom minimizacije nadomjesne potrošnje (engl. Equivalent Consumption Minimization Strategy, ECMS). U toj strategiji uzima se u obzir fiktivni tok goriva u/iz baterije (m_{batt}) i dodaje se stvarnom toku goriva iz benzinskog motora (m_{fuel}).

$$m_{eq} = m_{fuel} + m_{batt} \quad (11)$$

Izraz (11) potrebno je minimizirati, tj. traži se radna točka benzinskog motora koja minimizira nadomjesnu potrošnju goriva. Ovim proširenjem optimalna radna točka ne mora biti i radna točka s najvećom korisnošću benzinskog motora. Postoje dva moguća pristupa ECMS optimizacije:

- 1D-ECMS koji traži optimalnu radnu točku benzinskog motora na krivulji konstantne snage
- 2D-ECMS koji traži optimalnu radnu točku na proširenom području mape motora, dok je radno područje ipak ograničeno kako bi se ECMS “prisilio” da puni bateriju.

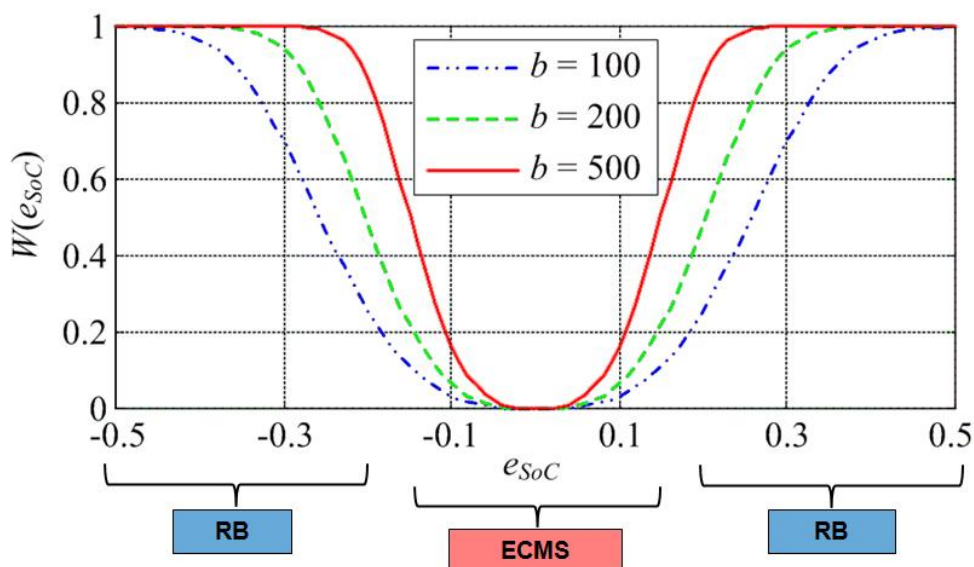
Kombinacijom RB i 1D-ECMS strategije omogućava se optimiranje upravljačkih varijabli po ECMS kriteriju i istodobno zadovoljenje tražene snage benzinskog motora.



Slika 4.3. Kombinacija RB i 1D-ECMS strategije.

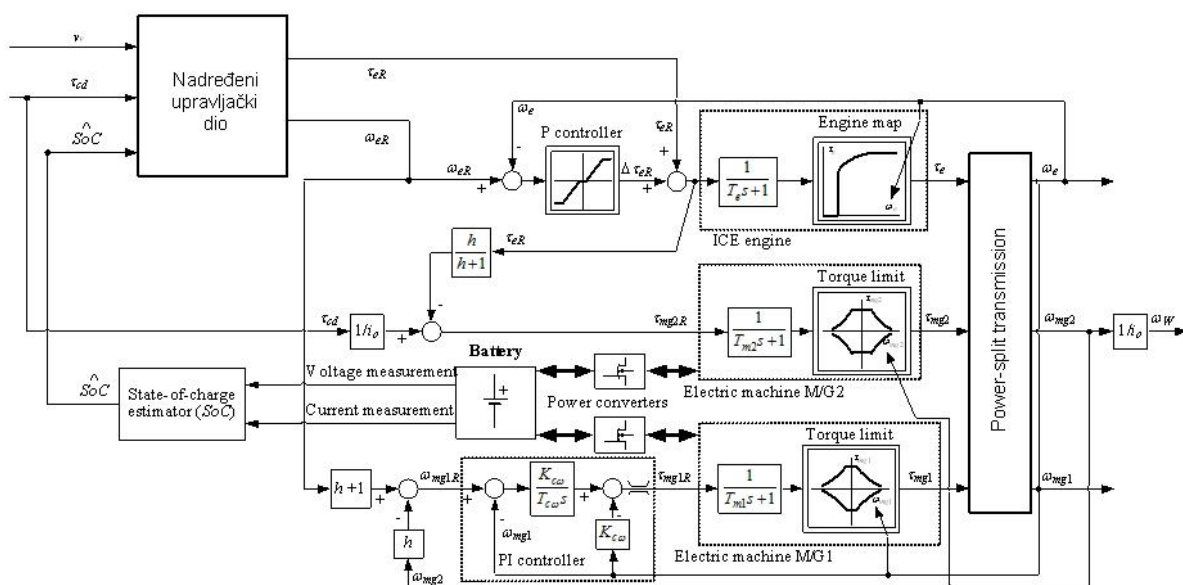
Nadalje 2D-ECMS optimiranje, koje ima više slobode pri odabiru radnih točaka i time veću mogućnost smanjenja ukupne potrošnje goriva, je moguće kombinirati s RB+1D-ECMS upravljačkom strategijom koja garantira održavanje SoC-a.

Prijelaz između tih dviju strategija (2D-ECMS, RB+1D-ECMS) je gladak i ovisi o odstupanju SoC-a od referentne vrijednosti (ovdje 50%) e_{SoC} - ako je $e_{SoC} \approx 0$ dominantna je 2D-ECMS strategija, a ako e_{SoC} bitnije odstupi od nule, RB+1D-ECMS postaje dominantan (Slika 4.4.).



Slika 4.4 Prijelaz između dviju strategija upravljanja

U ovom radu koristit će se RB+ECMS algoritam, pošto se njime dobivaju najbolji rezultati. Nadređeni upravljački dio potom šalje referencu radne točke benzinskog motora (moment i brzina vrtnje bezninskog motora) u podređeni upravljački dio koji na temelju toga određuje referentne iznose momenta za benzinski motor kao i za strojeve M/G₁ i M/G₂.

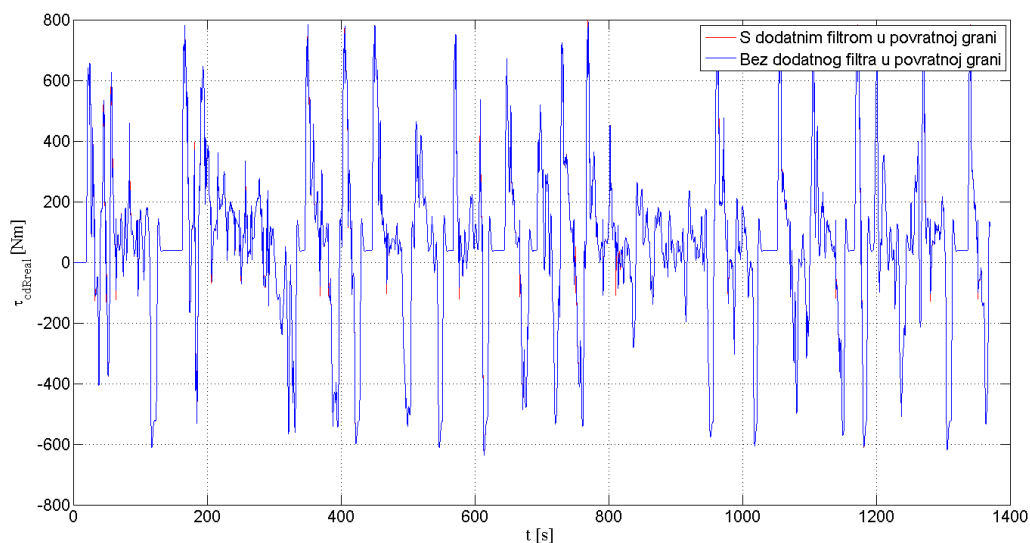


Slika 4.5. Podređeni upravljački dio.

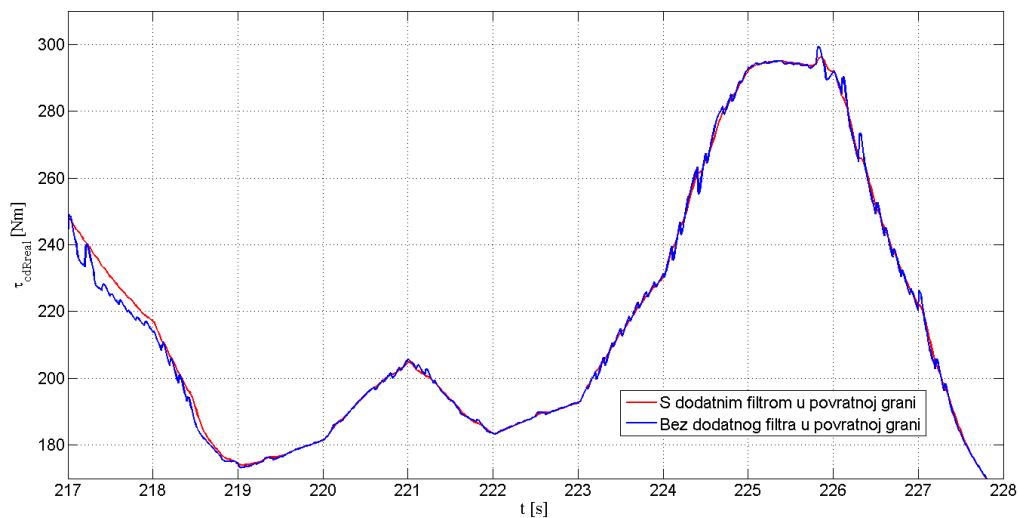
Kako u dosadašnjem modelu, za računanje reference momenta stroja M/G_2 , nije uzeto u obzir vremensko kašnjenje razvijanja momenta benzinskog motora što negativno utječe na kvalitetu vožnje, odnosno ukupni izlazni moment pogona, u ovom radu prikazat će se dobiveni rezultati kad se kašnjenje uzme u obzir (filtriranje momenta benzinskog motora za potrebe računanja reference momenta stroja M/G_2).

$$\tau_{mg2R} = \frac{\tau_{cd}}{i_0} - \frac{h}{h+1} \tau_{eR}. \quad (12)$$

Također, analizirat će se mogućnost računanja reference momenta stroja M/G_2 , na način da se od ukupnog referentnog momenta (τ_{cdR}) oduzme referenca momenta stroja M/G_1 , pošto je ta referenca proporcionalna referenci momenta benzinskog motora. U nastavku će se prikazati izlazni moment τ_{cd} za slučaj kada je u obzir uzeto kašnjenje benzinskog motora (dodani filter u povratnoj grani).



Slika 4.6. Usporedba izlaznog momenta sa i bez filtra.

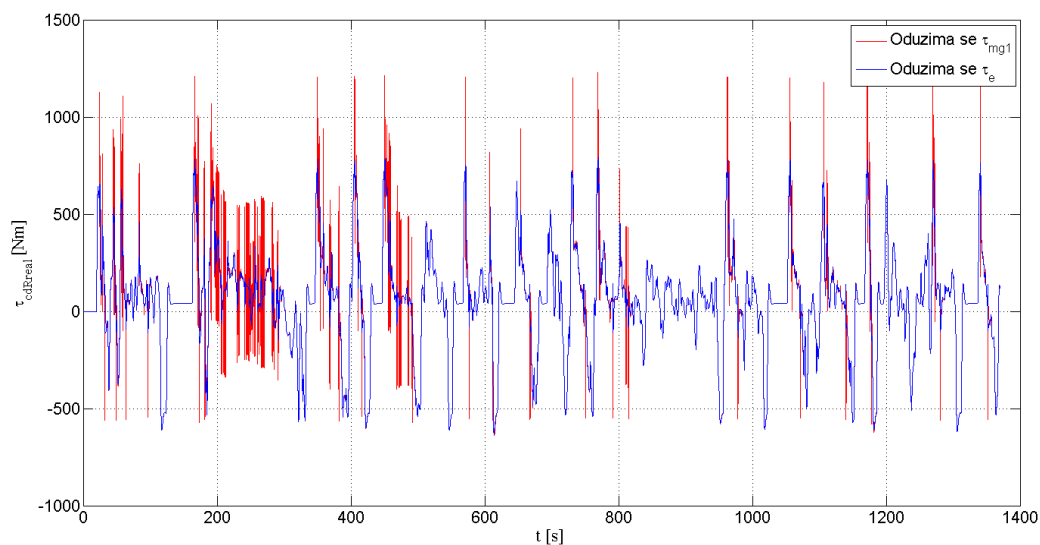


Slika 4.7. Usporedba izlaznog momenta - uvećan detalj.

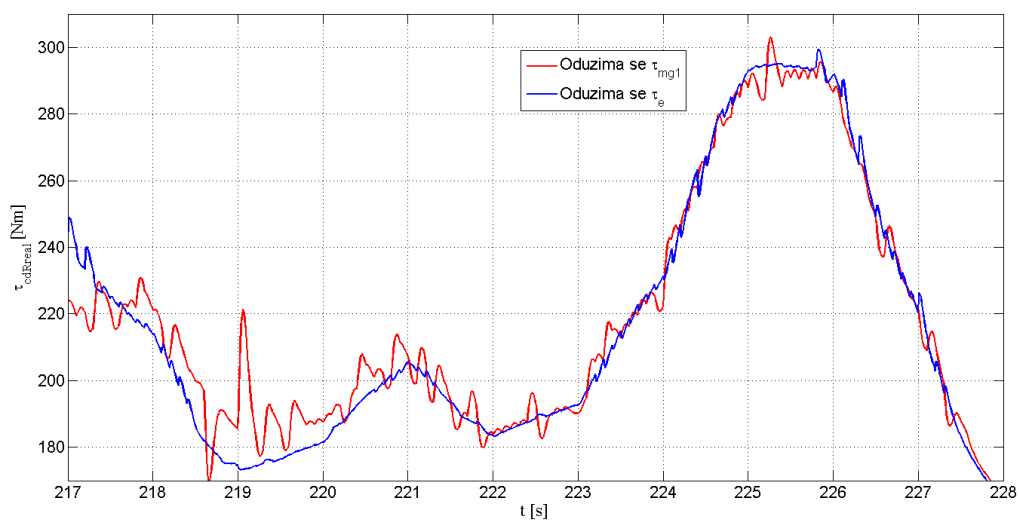
Može se primjetiti kako se dodanim filtriranjem, odnosno uzimanjem u obzir kašnjenja razvijanja momenta benzinskog stroja dobivaju manje oscilacije izlaznog momenta, odnosno povećava se kvaliteta vožnje. U nastavku će se prikazati rezultati kada se za potrebe računanja reference stroja M/G_2 koristi referentni signal momenta stroja M/G_1 .

$$\tau_{mg2R} = \frac{\tau_{cd}}{i_0} - h \cdot \tau_{mg1R}. \quad (13)$$

Izraz (13) modifikacija je izraza (12) – razlika je u kinematskim odnosima među veličinama.



Slika 4.8. Usporedba izlaznog momenta.



Slika 4.9. Usporedba izlaznog momenta - uvećan detalj.

Crvenom linijom prikazana je krivulja izlaznog momenta kad se referenca momenta stroja M/G_2 računa prema izrazu (13), dok je plavom linijom označena krivulja izlaznog momenta kad se referenca momenta stroja M/G_2 računa prema izrazu (12). Primjećuje se da se na taj način dobivaju lošiji rezultati, tj. još veće oscilacije izlaznog momenta pri čemu je moguće da je jedan od uzroka vjerojatno ne uzimanje u obzir inercije stroja M/G_1 .

5. Proširenje kriterijske funkcije penalizacijskim članom

U svrhu povećanja kvalitete vožnje, odnosno smanjenja oscilacija brzine vrtnje benzinskog motora, može se u kriterijsku funkciju (11) dodati penalizacijski član. Kriterijska funkcija sada je sljedećeg oblika:

$$\dot{m}_{eq} = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{batt} + \text{penalizacija}, \quad (14)$$

pri čemu je penalizacija

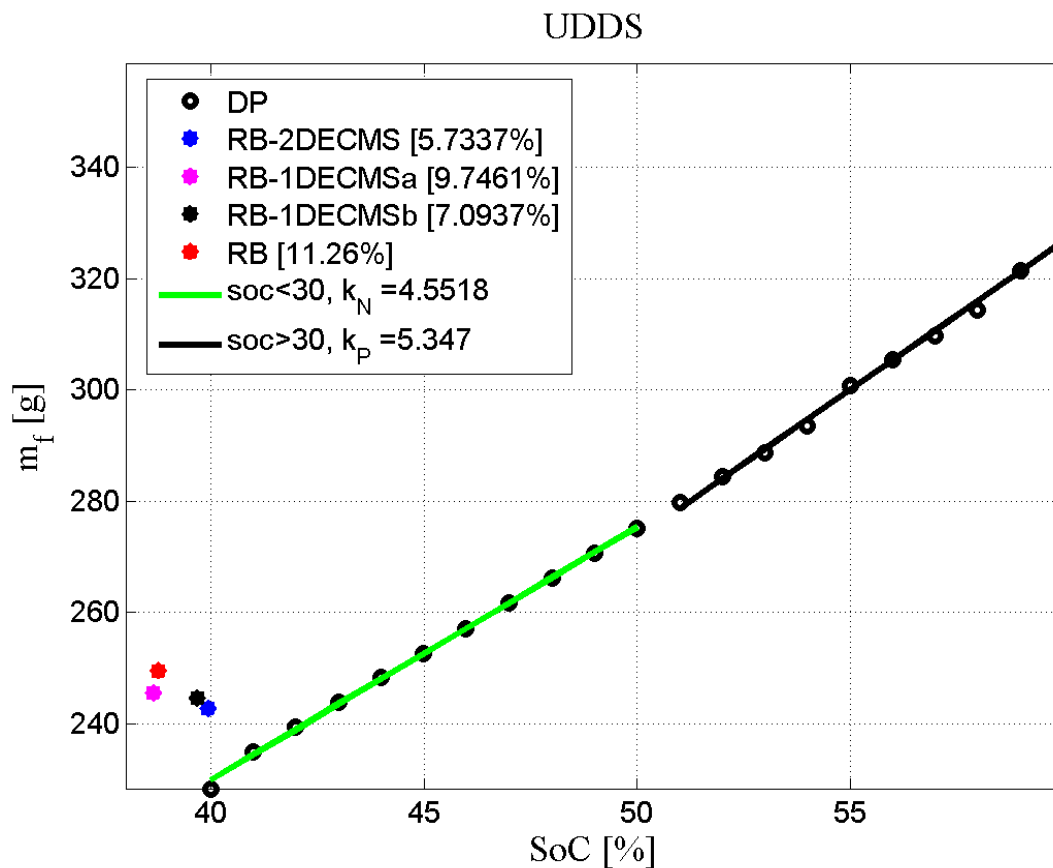
- $K \cdot \text{udaljenost},$

$$\text{udaljenost} = \sqrt{(\omega_{eR} - \omega_{eR_prethodni})^2 + (\tau_{eR} - \tau_{eR_prethodni})^2}. \quad (15)$$

- $K \cdot \text{udaljenost},$

$$\text{udaljenost} = (\omega_{eR} - \omega_{eR_prethodni})^2. \quad (16)$$

U nastavku će se prikazati rezultati dobiveni simulacijom za različita pojačanja K , pri čemu iznos pojačanja $K = 0$ odgovara strategiji bez penalizacijskog člana, odnosno penalizacijski član jednak je nuli. Prikazat će se referentni signali brzine vrtnje benzinskog motora za različita pojačanja K . Zatim će se prikazati koliko je realna upravljačka strategija lošija od najboljeg mogućeg rješenja (globalnog optimuma dobivenim numeričkim optimiranjem za kvazistacionarni model hibridnog pogona) što se označava oznakom f_2 . Za izračunavanje globalnog optimuma koristi se algoritam dinamičkog programiranja (DP) i on procjenjuje potrošnju za određeni iznos SoC -a. Na slici 5.1. može se vidjeti princip izračuna optimalne potrošnje za određeni iznos SoC -a za UDDS ciklus.

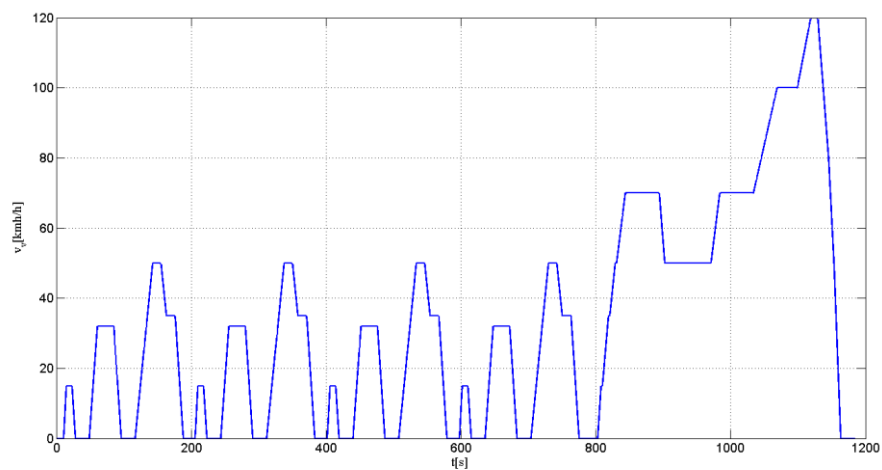
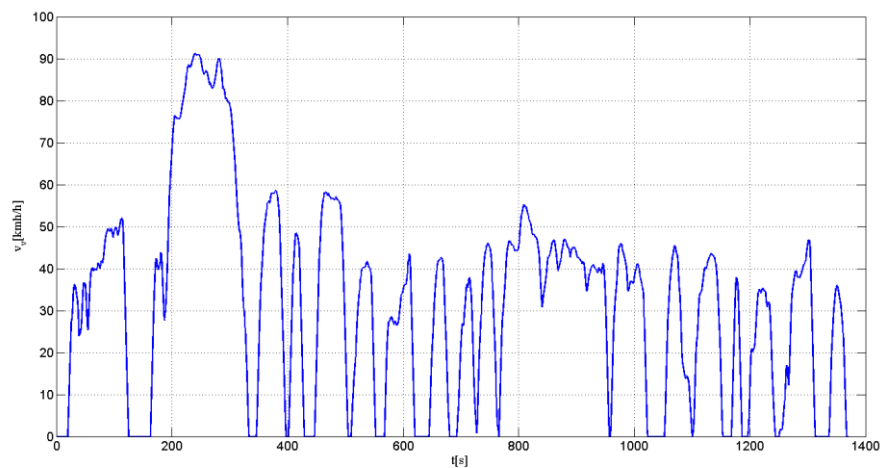
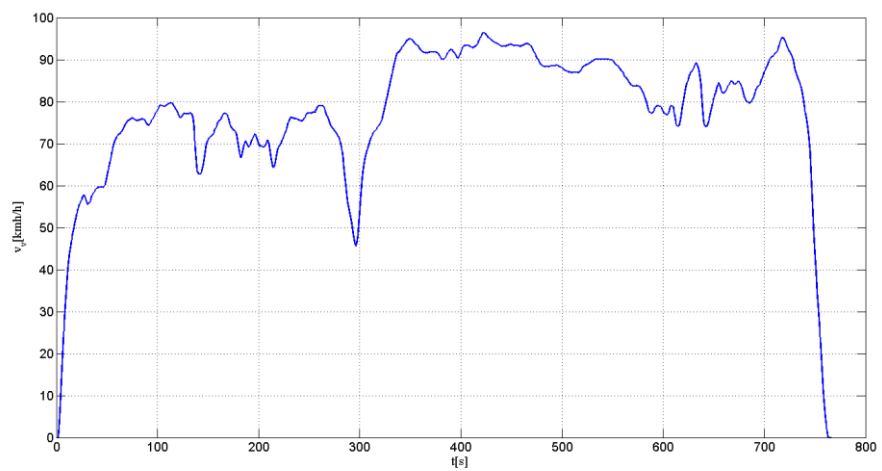


Slika 5.1. Usporedba realne strategije s globalno optimalnim dinamičkim programiranjem

Također će se pratiti u kolikoj se mjeri stvarni moment razlikuje od tražene reference (u funkciji od K). Nadalje, prikazat će se aktivnost baterije i konačno stanje napunjenosti baterije (SoC) za različite parametre K . Aktivnost baterije računa se na pomoću sljedeće relacije:

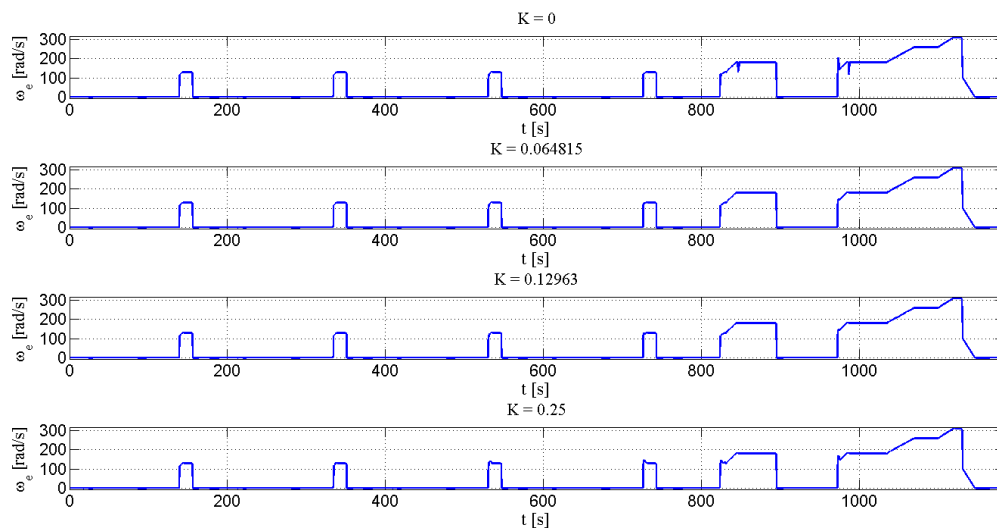
$$aktivnost = \int |SoC'|, \quad (17)$$

pri čemu derivaciju SoC -a dobivamo iz modela. Simulacija će se provesti za više certificiranih voznih ciklusa čije referentne brzine vozila prikazuju sljedeće slike.

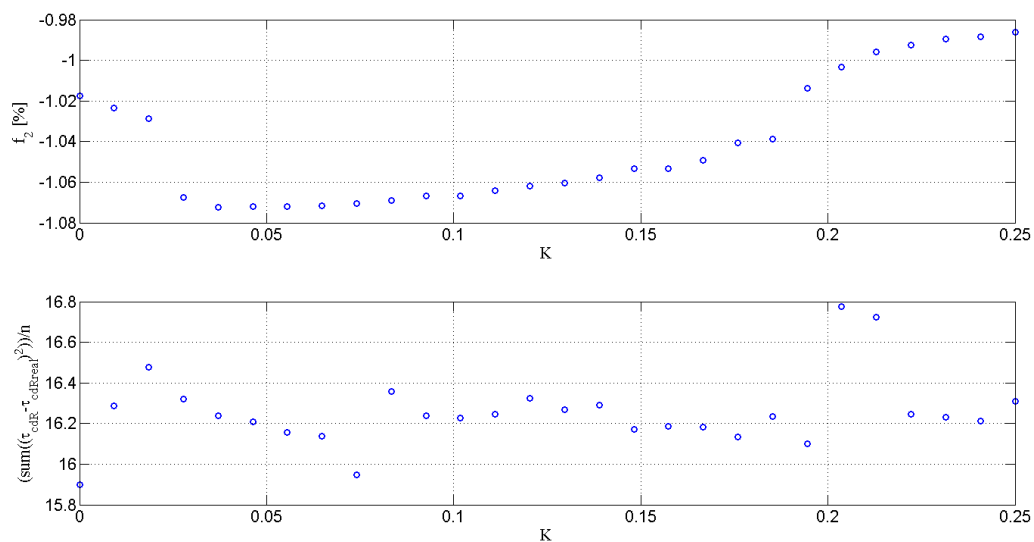
**Slika 5.2. Brzina vozila za NEDC ciklus.****Slika 5.3. Brzina vozila za UDDS ciklus.****Slika 5.4. Brzina vozila za HWFET ciklus.**

5.1. Penaliziranje promjene radne točke benzinskog motora – strategija 1

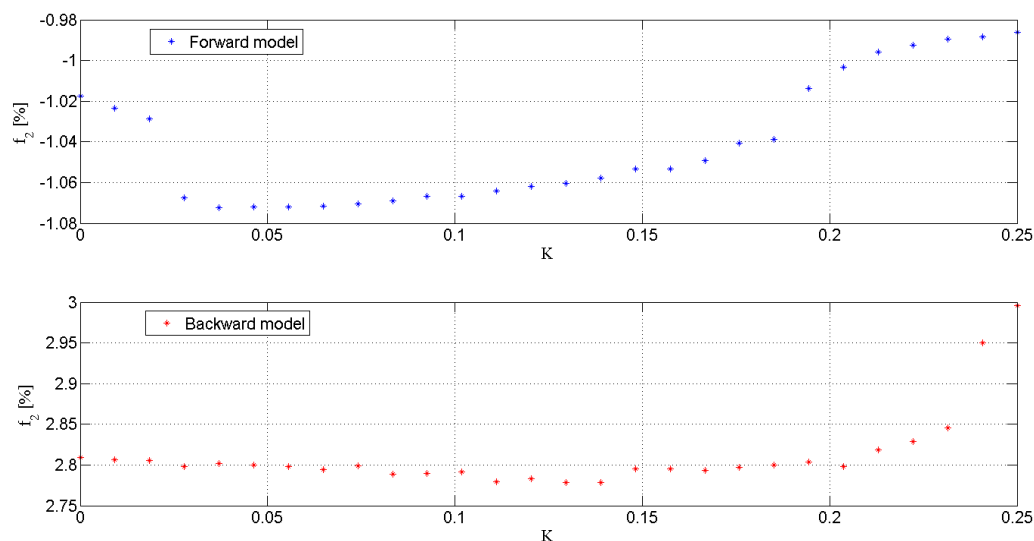
5.1.1. NEDC ciklus



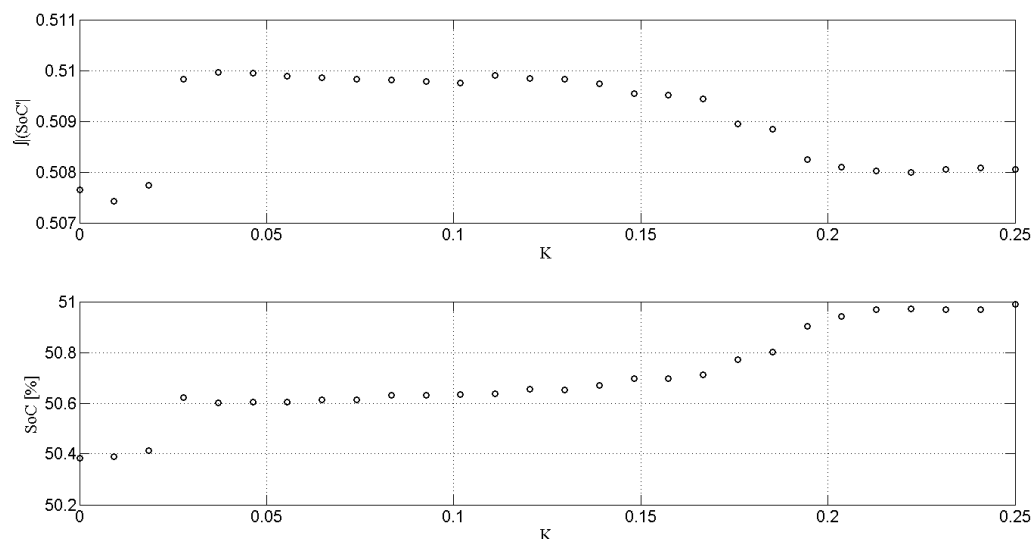
Slika 5.5. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.



Slika 5.6. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K .



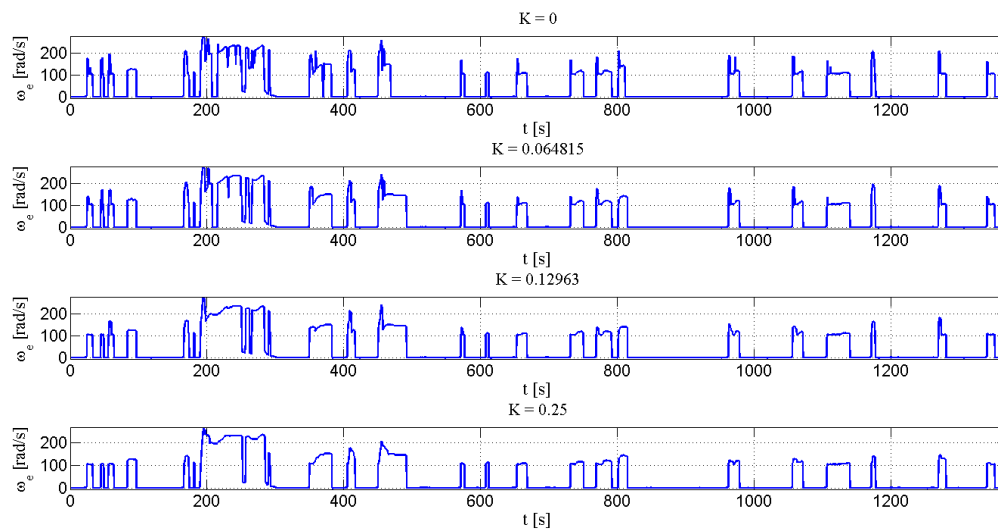
Slika 5.7. Usporedba potrošnje backward i forward modela.



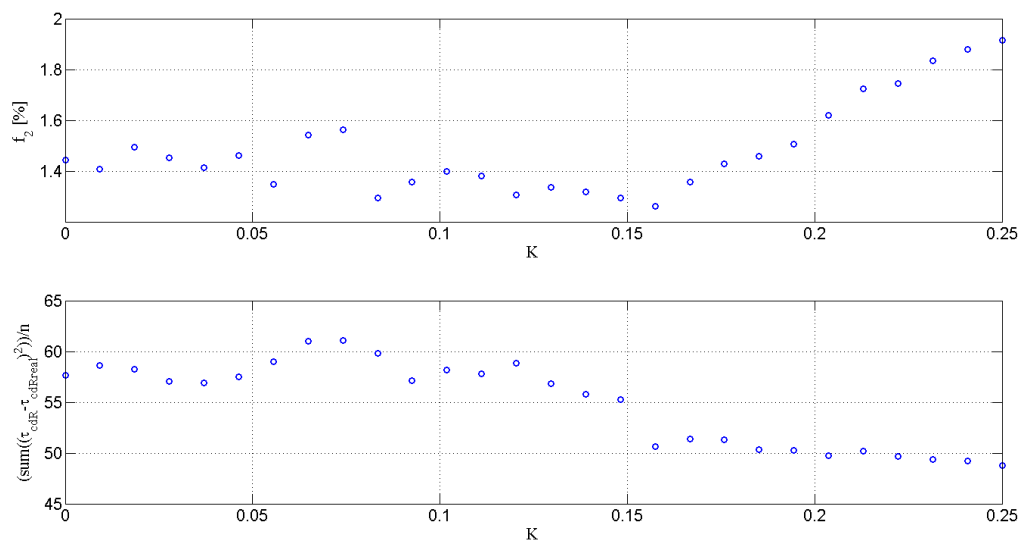
Slika 5.8. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K.

Može se primjetiti kako se dodavanjem penalizacijskog člana u kriterijsku funkciju dobivaju manji skokovi brzina vrtnje benzinskog motora (upravo iz razloga što se to kažnjava) što pozitivno utječe na kvalitetu vožnje. Također se dobiva nešto niža potrošnja, bolje se zadovoljava zahtjev za izlaznim momentom i dobiva povećano stanje napunjenosti baterije, iako su te promjene vrlo male. Kako bi se mogli proizvesti zaključci i detaljnije analizirati dobiveni rezultati, prikazat će se rezultati i za preostale cikluse.

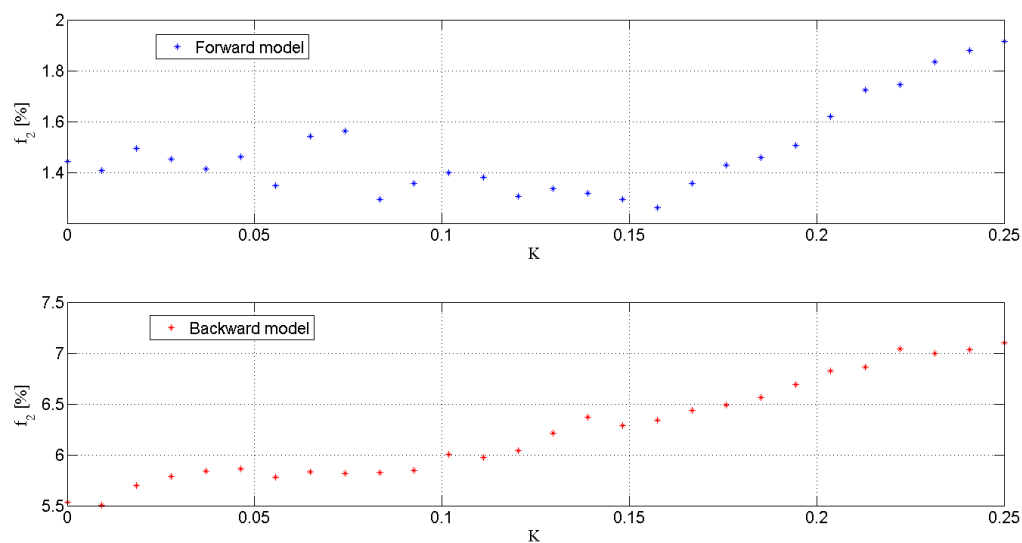
5.1.2. UDDS ciklus



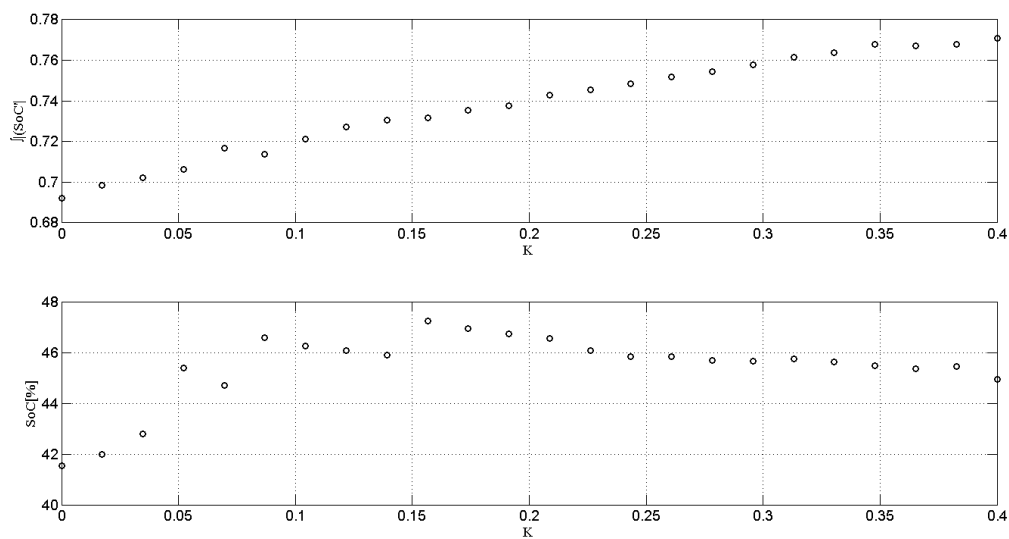
Slika 5.9. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.



Slika 5.10. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K .

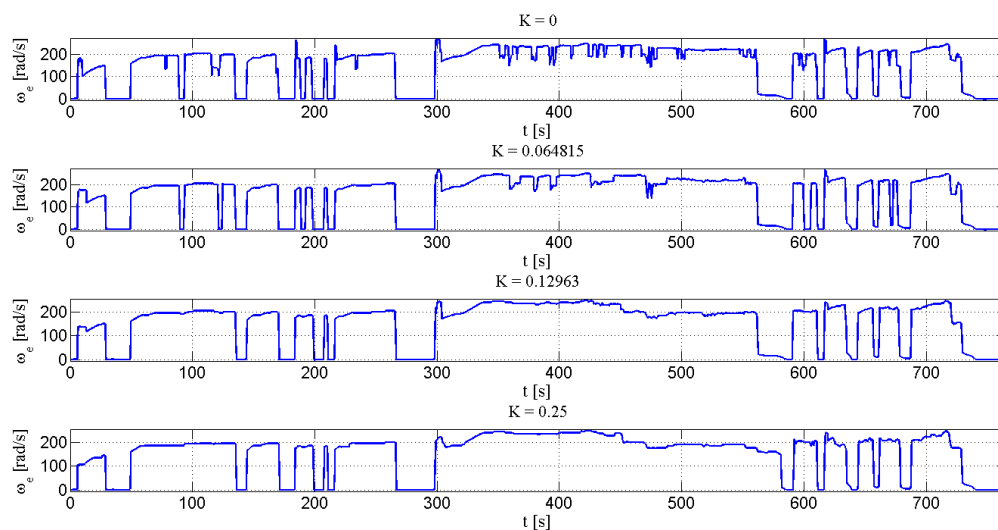


Slika 5.11. Usporedba potrošnje backward i forward modela.

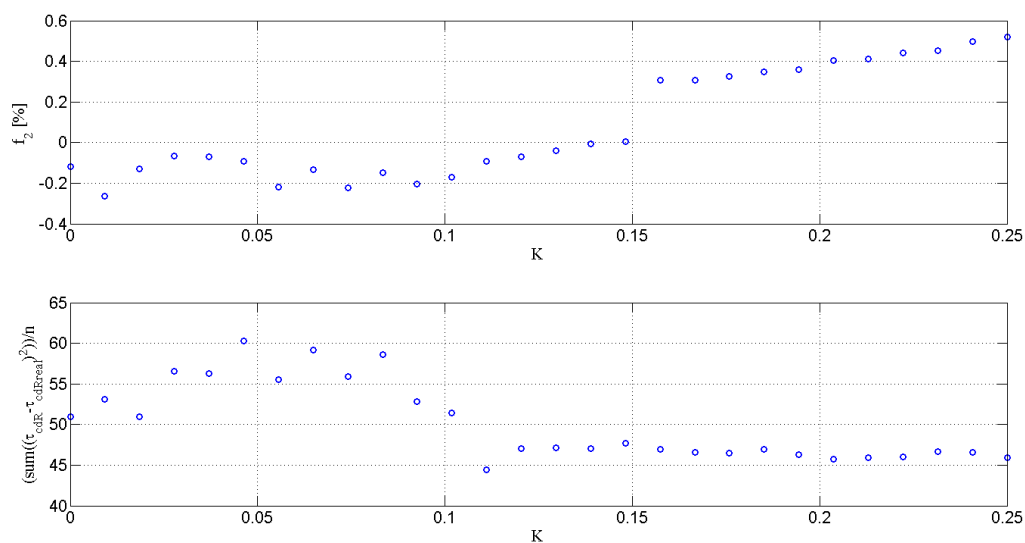


Slika 5.12. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K .

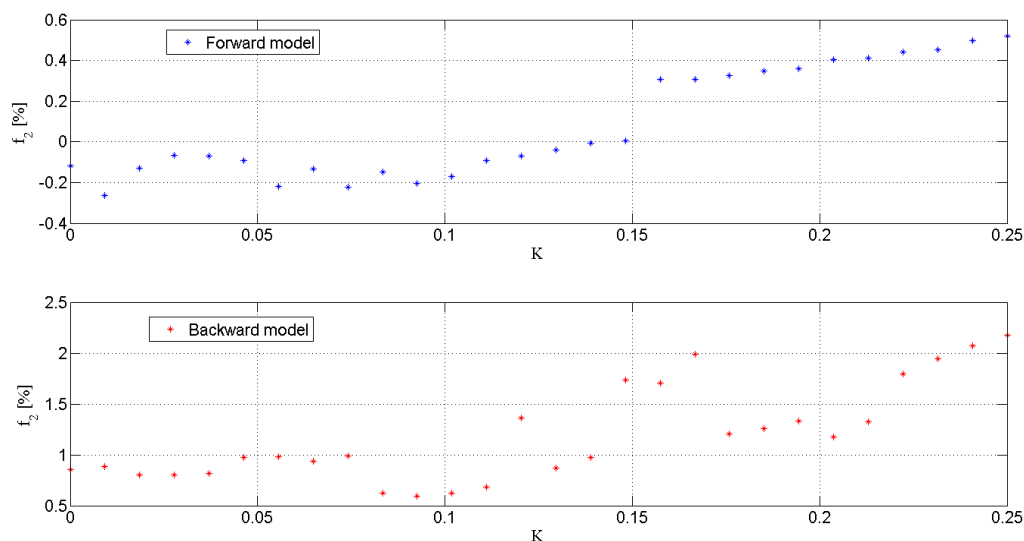
5.1.3. HWFET ciklus



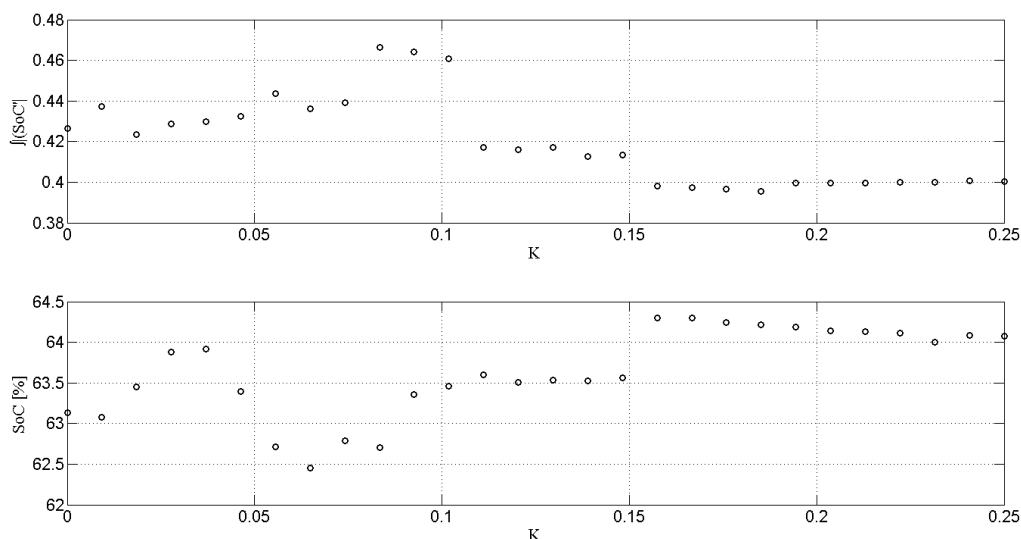
Slika 5.13. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.



Slika 5.14. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K.



Slika 5.15. Usporedba potrošnje backward i forward modela.

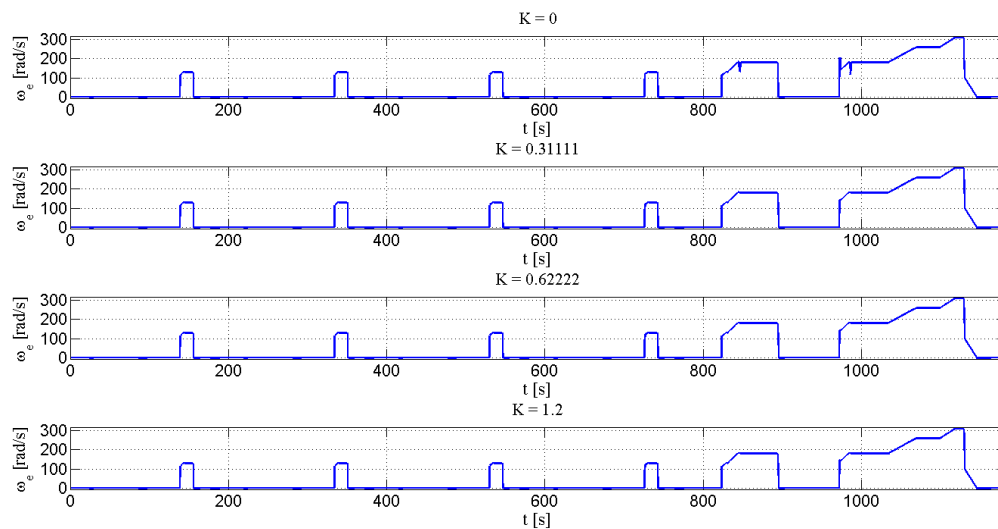


Slika 5.16. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K.

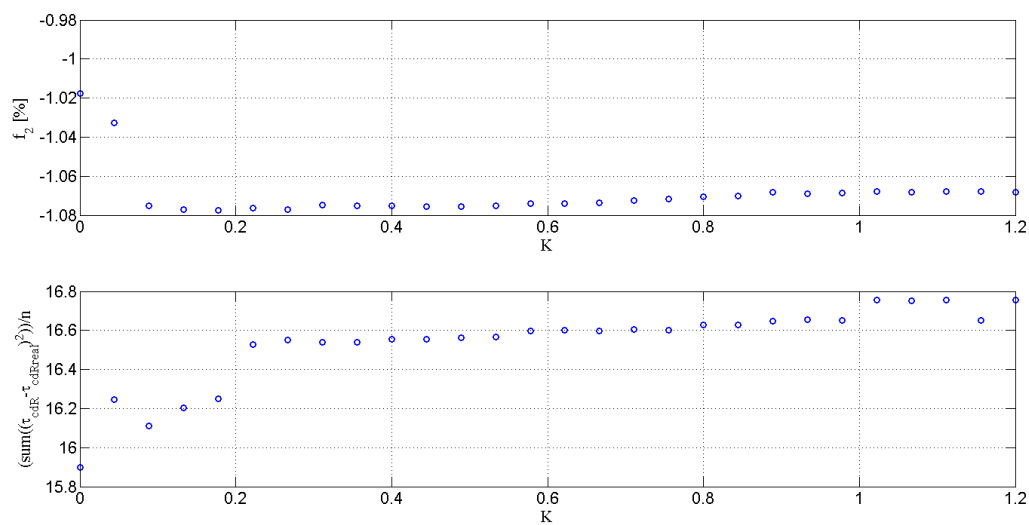
Primjećuju se slične tendencije i za UDDS i HWFET ciklus – “izgladenije” krivulje brzine vrtnje benzinskog motora, nešto manja potrošnja (posebice za najživlji UDDS ciklus), te povećanje stanja napunjenosti baterije (SoC) što je važno zbog vijeka trajanja baterije. Bitno je napomenuti da pokazatelj f_2 poprima i negativne zbog razlike u modelima (potrošnja dobivena na forward modelu uspoređuje se s globalnim optimumom backward modela), ali se ovaj način validacije može koristiti za usporedbe različitih strategija bez obzira na razlike u modelima.

5.2. Penaliziranje promjene brzine vrtnje benzinskog motora – strategija 2

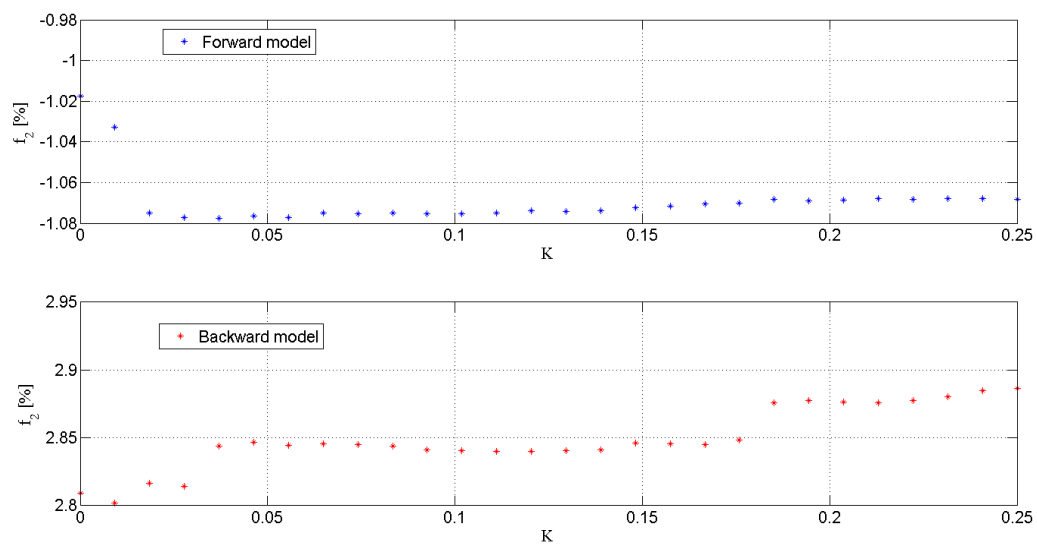
5.2.1. NEDC ciklus



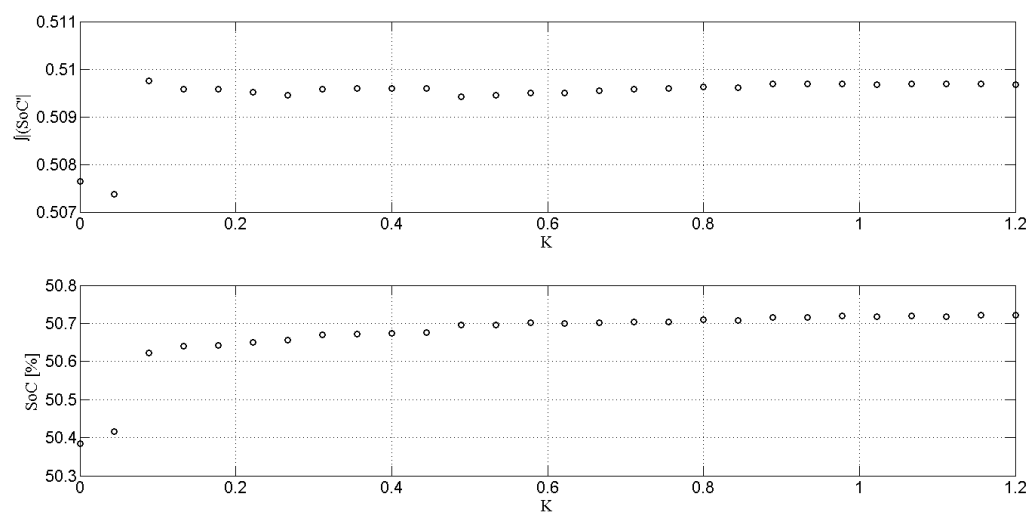
Slika 5.17. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.



Slika 5.18. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K .

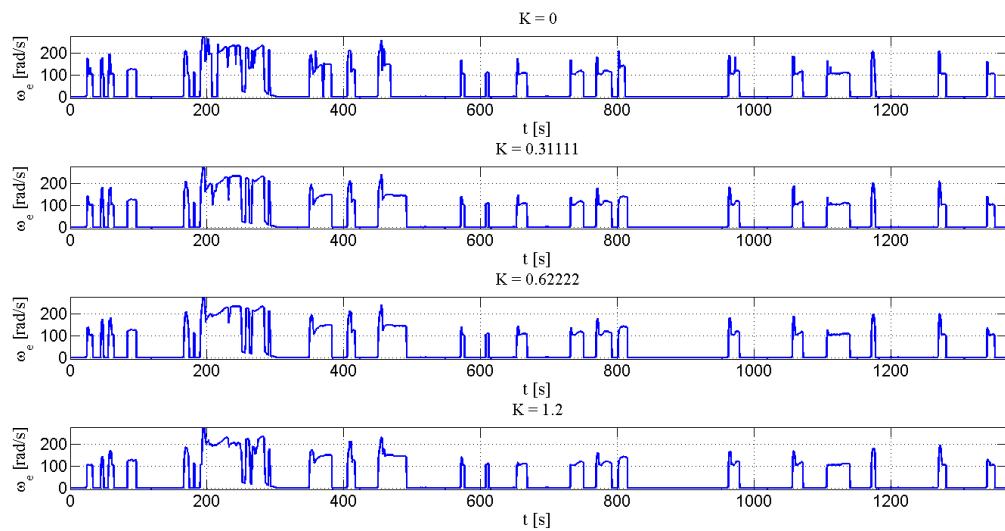


Slika 5.19. Usporedba potrošnje backward i forward modela.

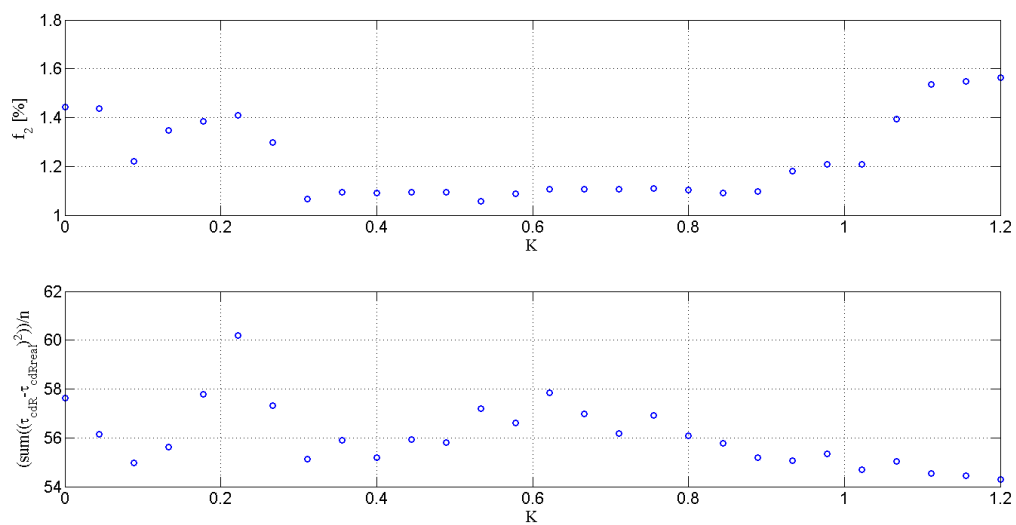


Slika 5.20. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K .

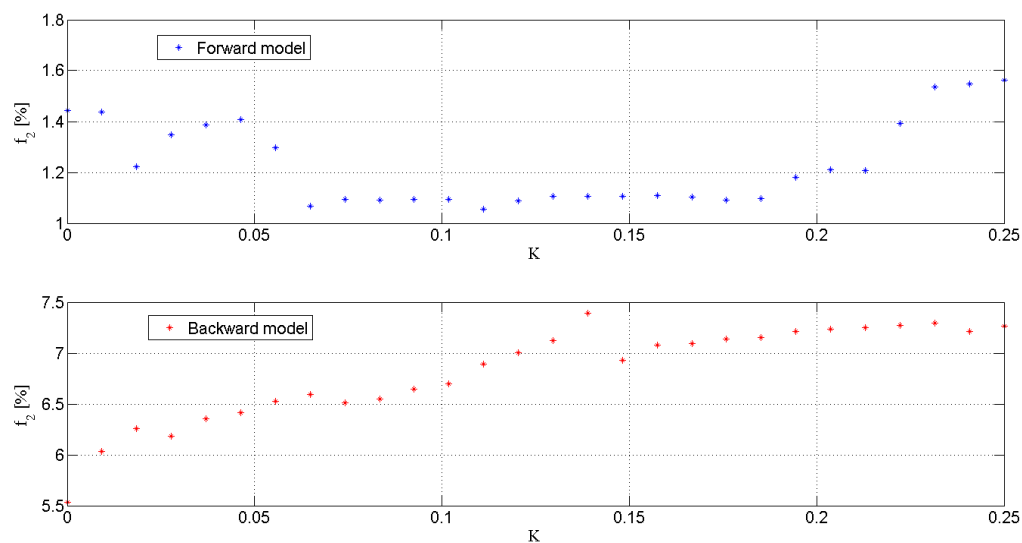
5.2.2. UDDS ciklus



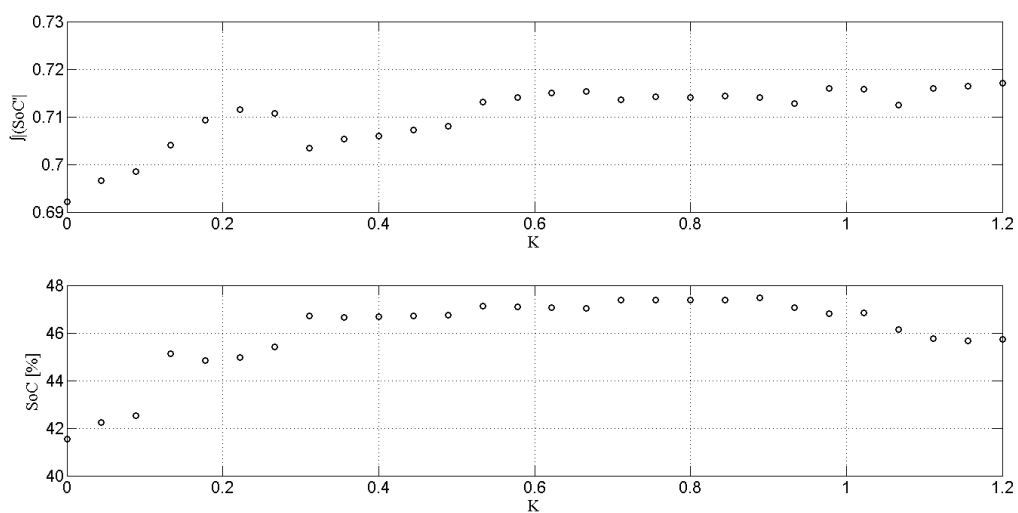
Slika 5.21. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.



Slika 5.22. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K .

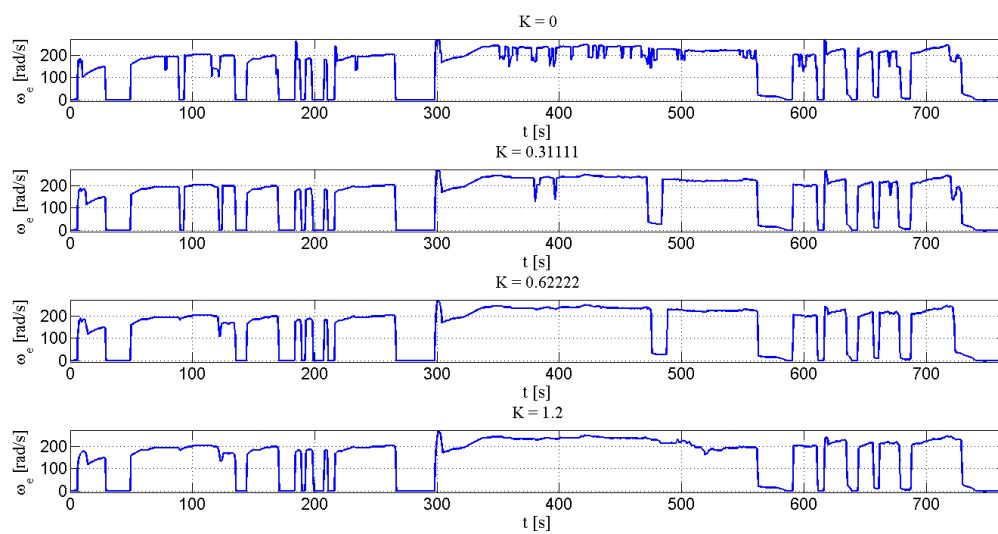


Slika 5.23. Usporedba potrošnje backward i forward modela.

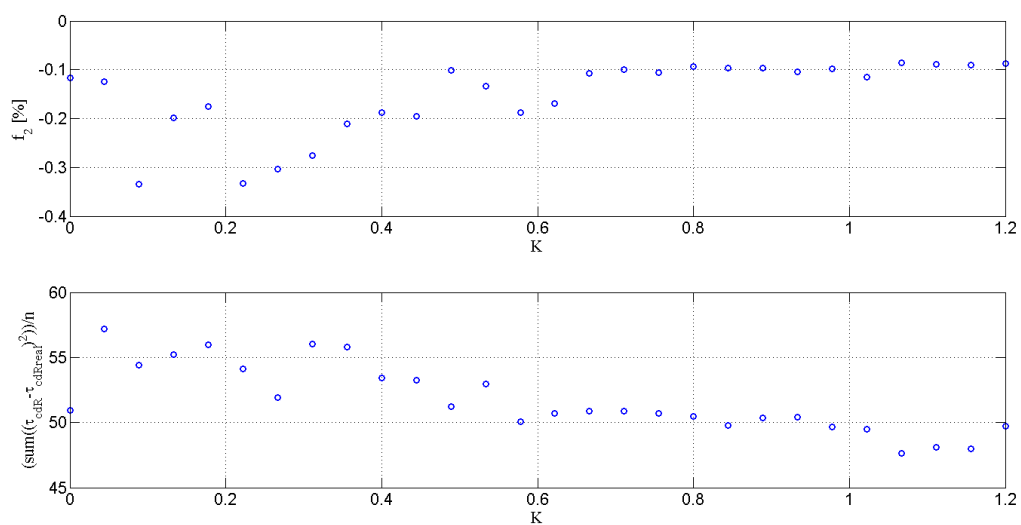


Slika 5.24. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K.

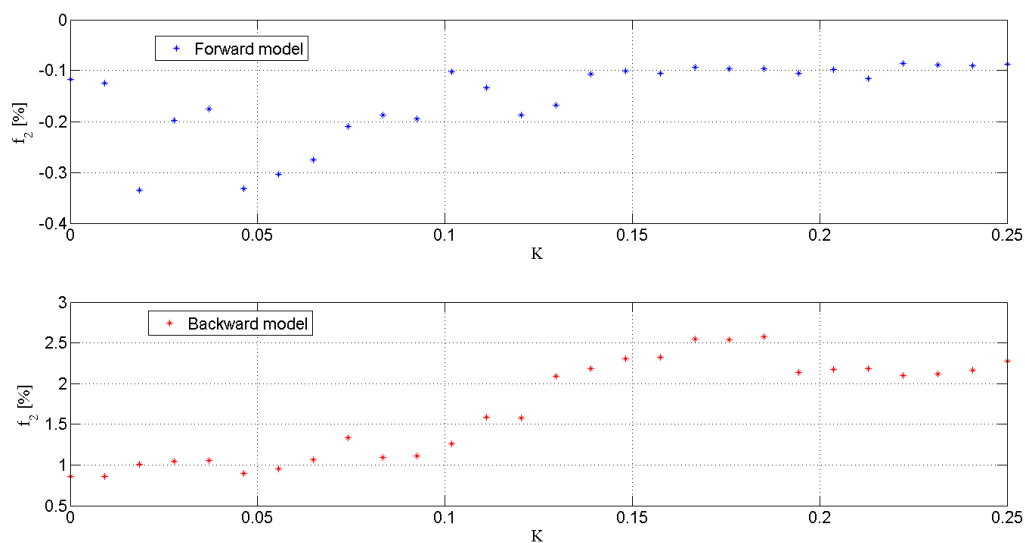
5.2.3. HWFET ciklus



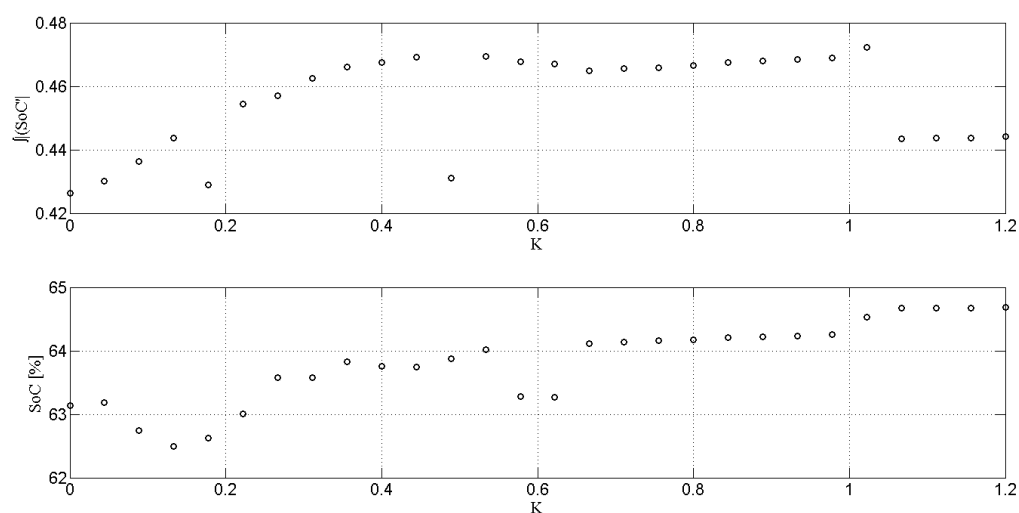
Slika 5.25. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.



Slika 5.26. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K .



Slika 5.27. Usporedba potrošnje backward i forward modela.

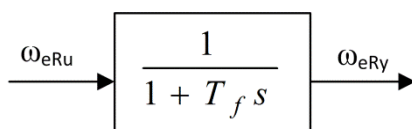


Slika 5.28. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K.

Može se primjetiti kako ova strategija daje i nešto bolje rezultate u odnosu na strategiju 1 u vidu nešto bolje potrošnje, dok se ostali trendovi (manje oscilacije brzine vrtnje benzinskog motora i povećavanje stanja napunjenosti baterije) zadržavaju. Za različite cikluse dobivaju se slični rezultati s tim da su oni bolji za “življe” cikluse poput UDDS i HWFET ciklusa, koji su i bliži vožnji u realnim uvjetima.

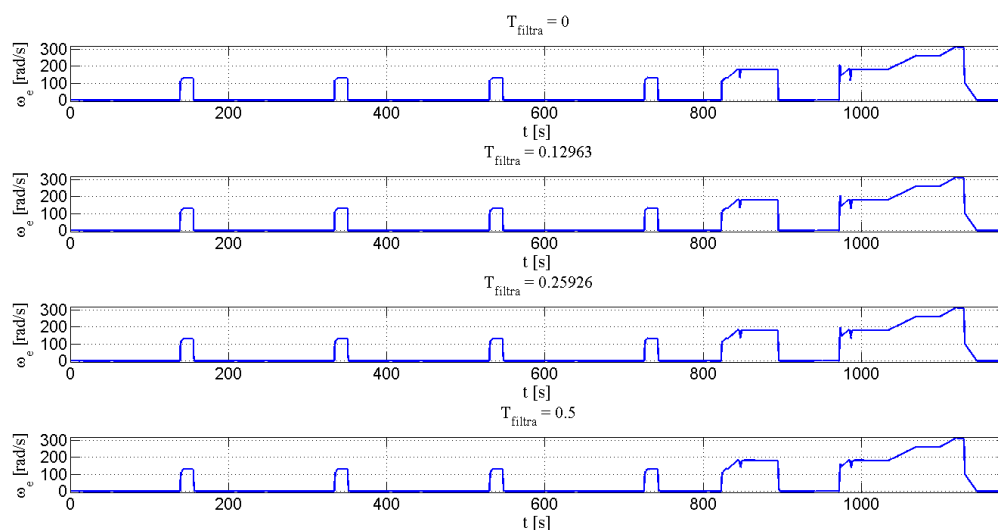
6. Niskopropusno filtriranje upravljačkih varijabli – strategija 3

Upravljačka varijabla nadređenog upravljačkog dijela sustava ω_{eR} provest će se kroz niskopropusni filtar sljedećeg oblika:

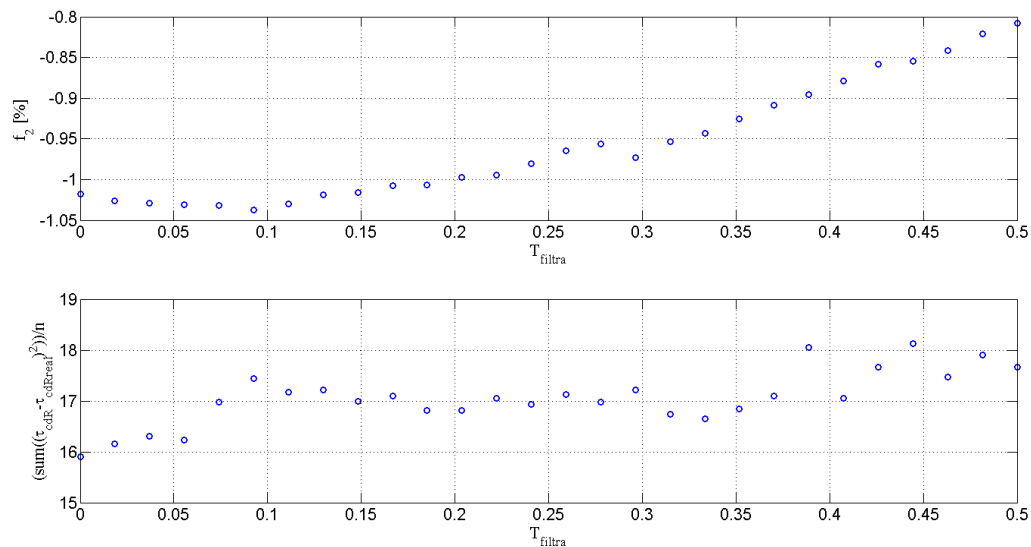


Pri čemu je T_f vremenska konstanta filtra. U nastavku će se prikazati rezultati dobiveni simulacijom za različite vrijednosti vremenske konstantne filtra kao i za različite certifikacijske vozne cikluse. Motivacija je ista kao i za dvije prethodno prikazane strategije – smanjiti oscilacije brzine vrtnje benzinskog motora i time poboljšati kvalitetu vožnje kao i eventualno smanjenje potrošnje.

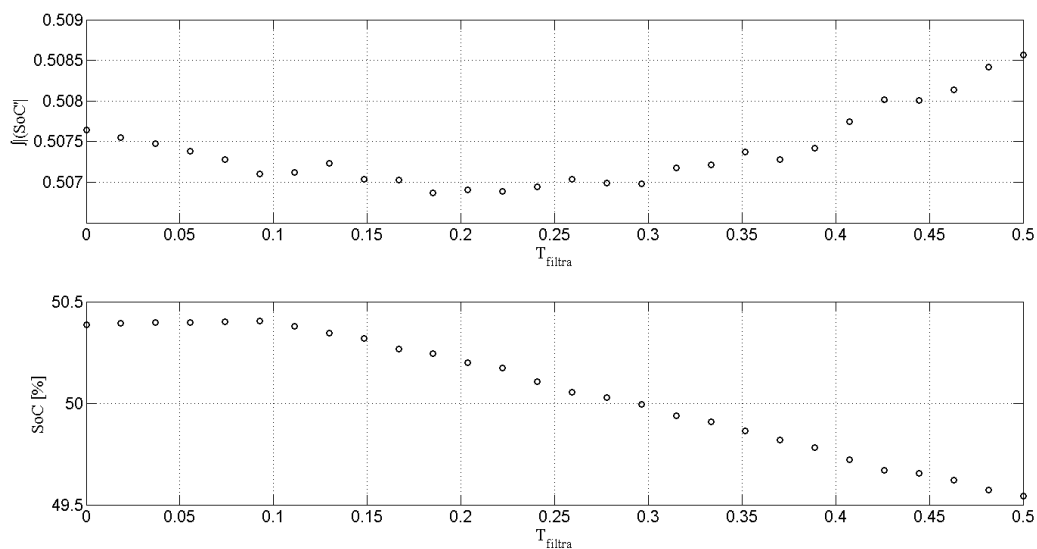
6.1. NEDC ciklus



Slika 6.1. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.



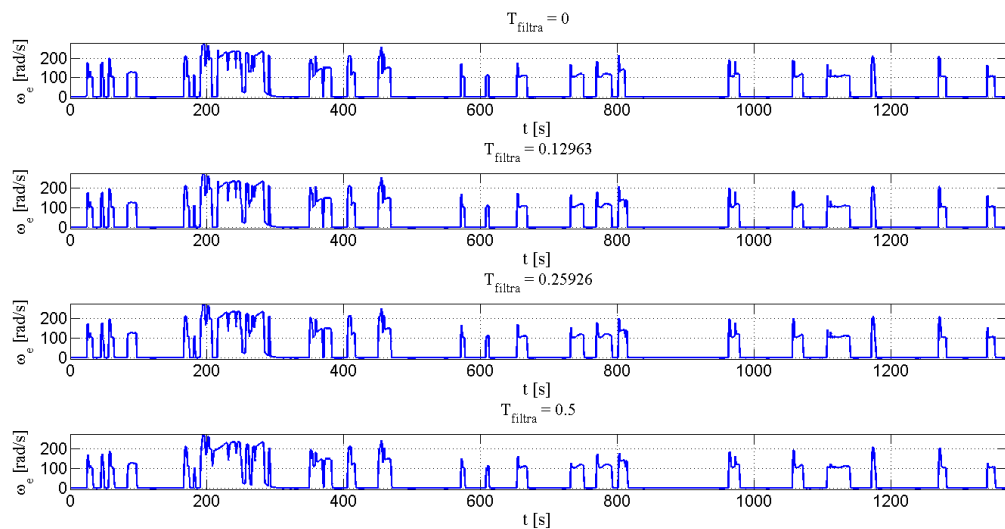
Slika 6.2. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K.



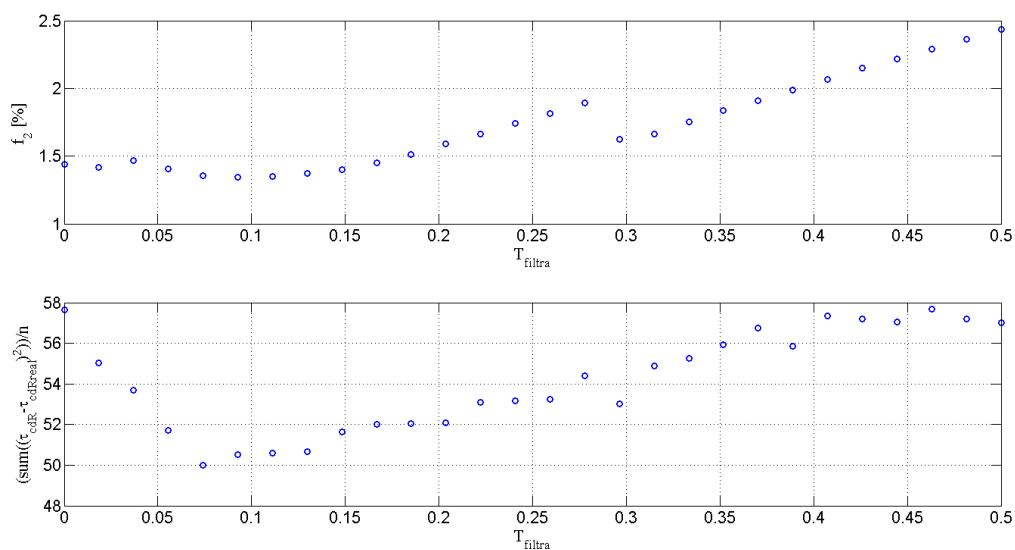
Slika 6.3. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K.

Primjećuju se slični trendovi s razlikom što se ovom strategijom ističe optimalna vrijednost vremenske konstantne filtra, dolazi do jedva zamjetnog pada potrošnje, dok se smanjuje i konačno stanje napunjenosti baterije, iako su te promjene vrlo male.

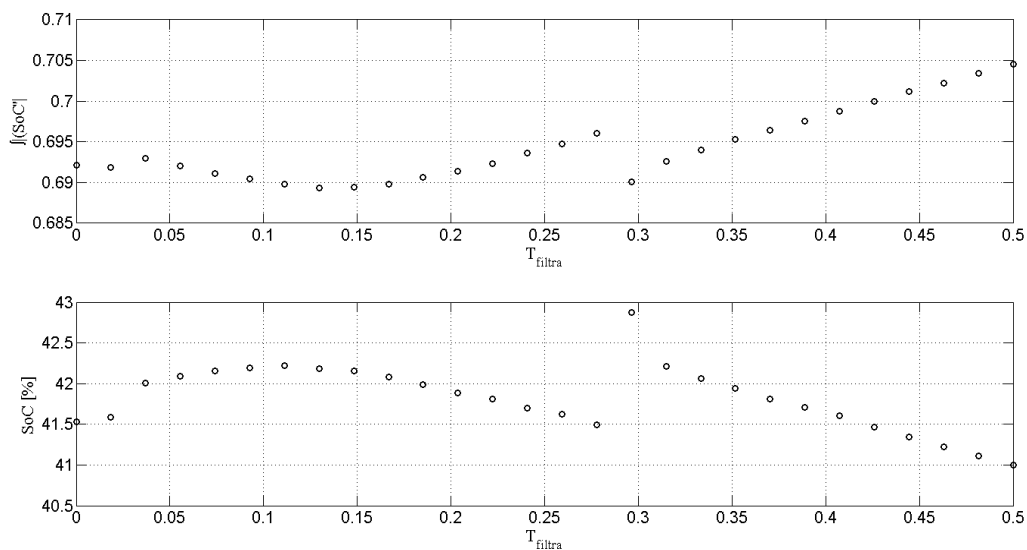
6.2. UDDS ciklus



Slika 6.4. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.

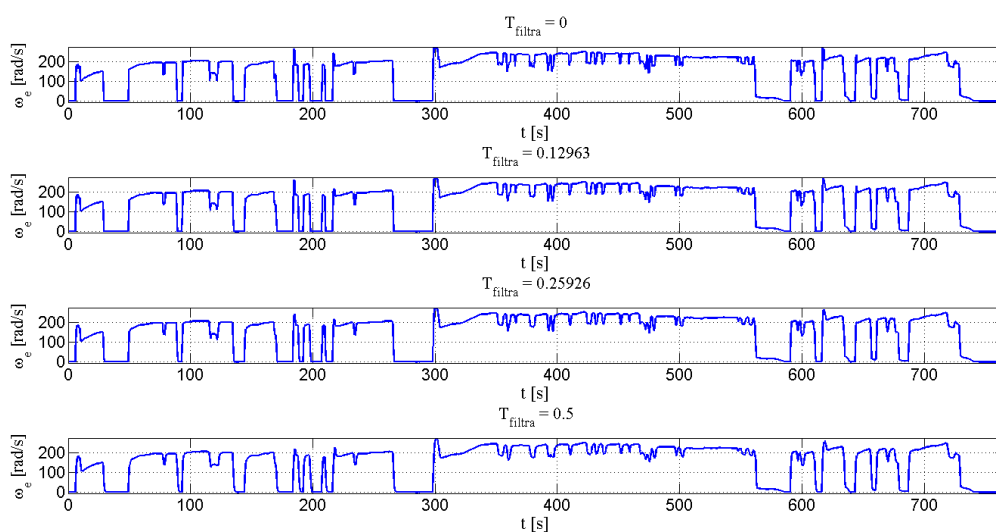


Slika 6.5. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K.

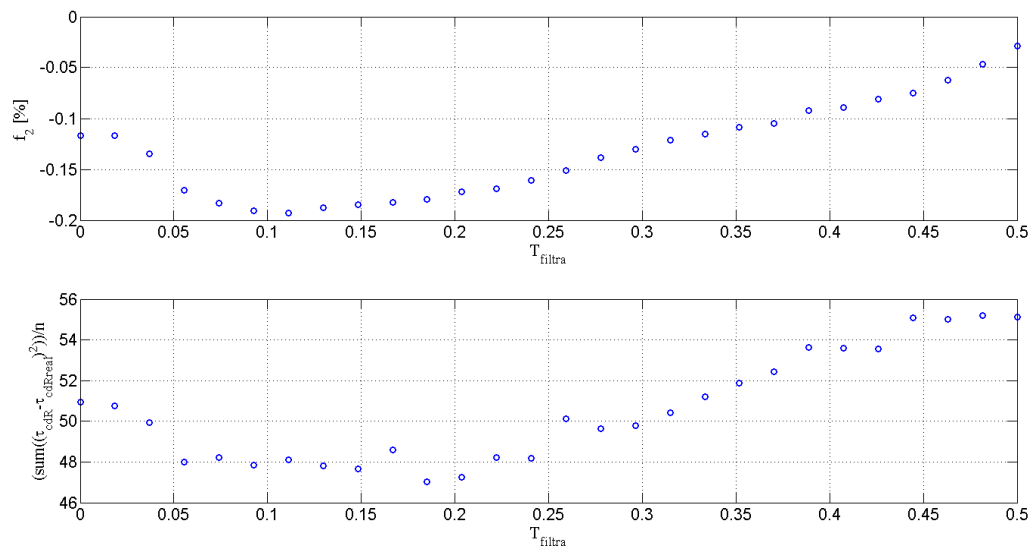


Slika 6.6. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K .

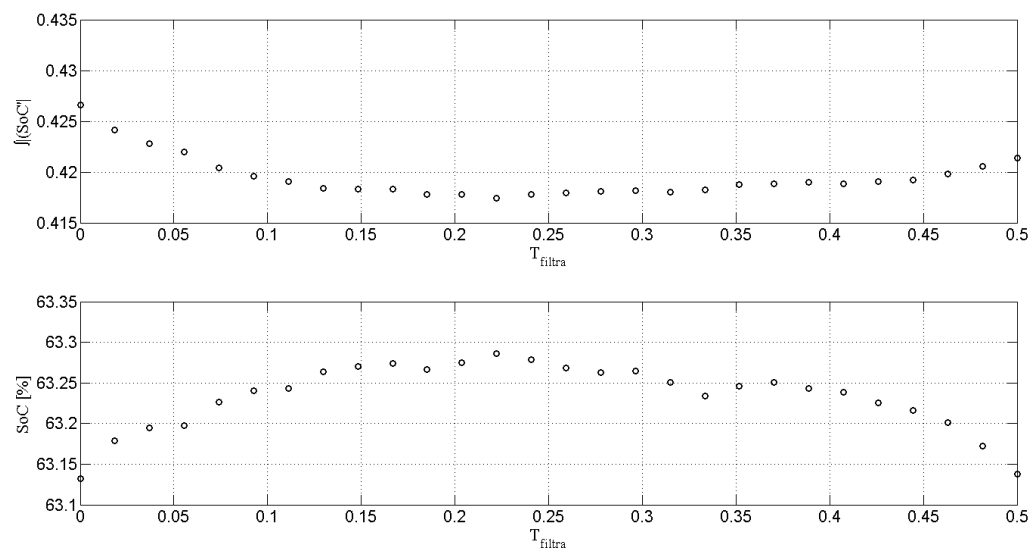
6.3. HWFET ciklus



Slika 6.7. Brzina vrtnje benzinskog motora u vremenu.



Slika 6.8. Potrošnja i razlika momenta za različite parametre K.



Slika 6.9. Aktivnost i stanje napunjenosti baterije za različite K.

Nakon što su prikazani rezultati svake od strategija poboljšanja kvalitete prijelaznih pojava u pogonskom sustavu hibridnih električnih vozila za tri certifikacijska vozna ciklusa, dat će se usporedba strategija, te će se na temelju prikazanih rezultata odabrati najbolja strategija za realnu primjenu i detaljnije će se analizirati rezultati odabrane strategije.

7. Usporedba rezultata

Tablica 7.1. Usporedba različitih strategija za NEDC ciklus.

NEDC			
	m_f [g]	SoC [%]	f_2 [%]
RB+ECMS	263.87	50.358	-1.0176 (0.0 %)
Strategija 1 ($K = 0.037$)	264.68	50.6	-1.0724 (-0.0548 %)
Strategija 2 ($K = 0.178$)	264.85	50.642	-1.0776 (-0.06 %)
Strategija 3 ($T_{\text{filtra}} = 0.0926$)	263.9	50.404	-1.0371 (-0.0195 %)

Tablica 7.2. Usporedba različitih strategija za UDDS ciklus.

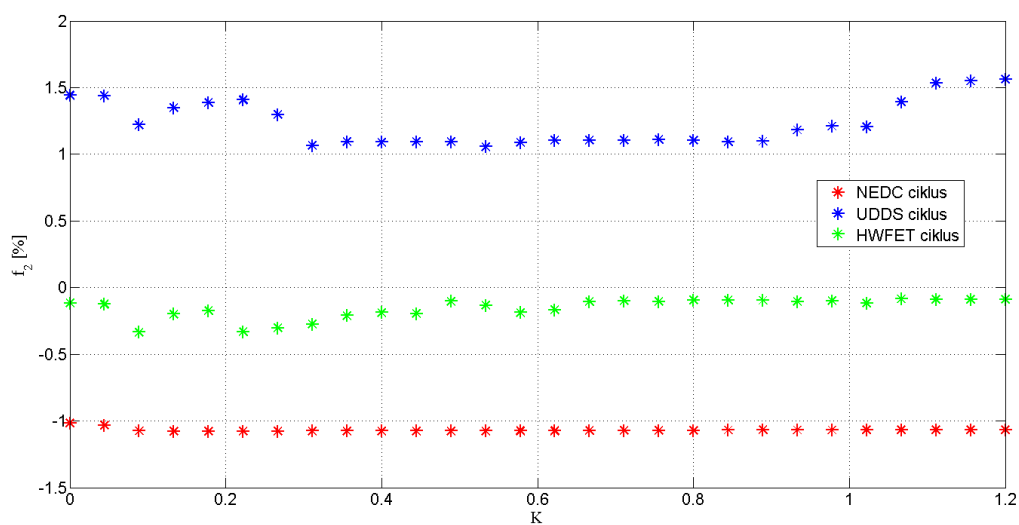
UDDS			
	m_f [g]	SoC [%]	f_2 [%]
RB+ECMS	240.07	41.533	1.4419 (0.0 %)
Strategija 1 ($K = 0.157$)	265.8	47.169	1.2603 (-0.1816 %)
Strategija 2 ($K = 0.533$)	265.06	47.125	1.0558 (-0.3861 %)
Strategija 3 ($T_{\text{filtra}} = 0.0926$)	242.91	42.195	1.3431 (-0.0988 %)

Tablica 7.3. Usporedba različitih strategija za HWFET ciklus.

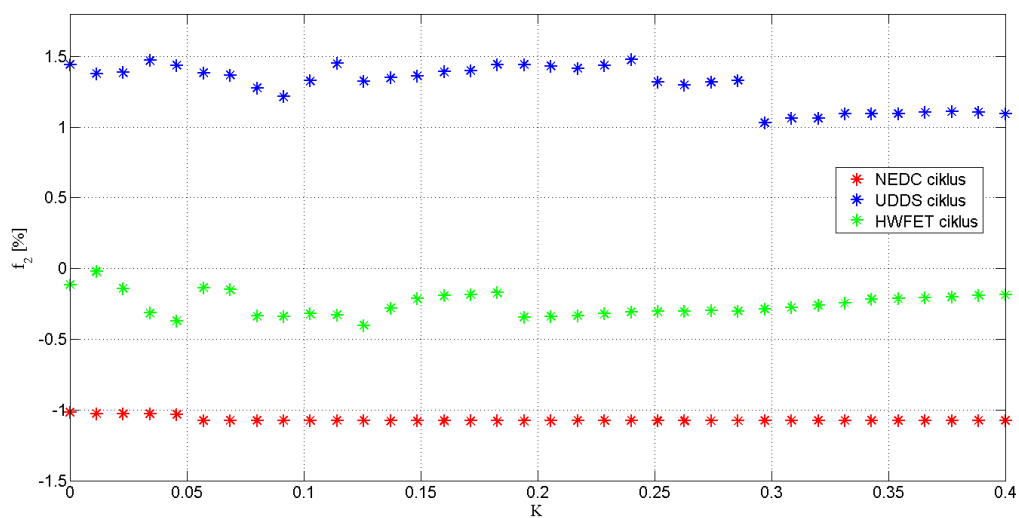
HWFET			
	m_f [g]	SoC [%]	f_2 [%]
RB+ECMS	513.22	63.132	-0.1165 (0.0 %)
Strategija 1 ($K = 0.0092$)	512.18	63.072	-0.2655 (-0.149 %)
Strategija 2 ($K = 0.0889$)	510.33	62.747	-0.3344 (-0.2179 %)
Strategija 3 ($T_{\text{filtra}} = 0.1111$)	513.34	63.242	-0.1930 (-0.0765 %)

Na temelju prikazanog, može se zaključiti kako najbolje rezultate daje strategija 2 (penaliziranje promjene brzine vrtnje benzinskog motora). U nastavku će se prikazati odabir optimalne vrijednosti parametra K za strategiju 2 te će se usporediti brzine vrtnje benzinskog motora sa i bez penalizacijskog člana i također će se prikazati raspored radnih točaka benzinskog motora na mapi motora usporedno sa penalizacijom i bez nje kao i za backward

model za sve certifikacijske cikluse.



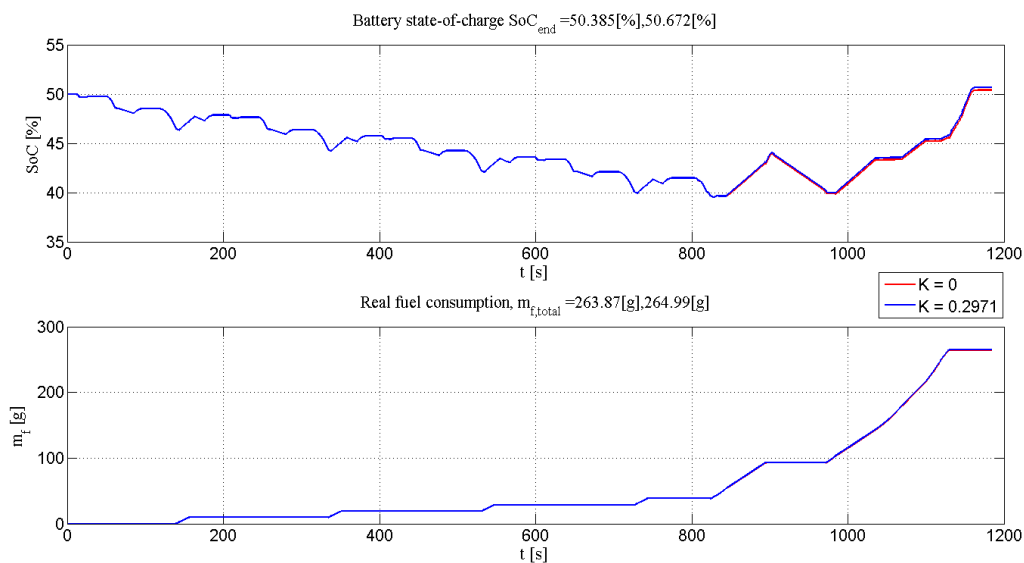
Slika 7.1. Usporedba potrošnje za različite cikluse u ovisnosti o parametru K.



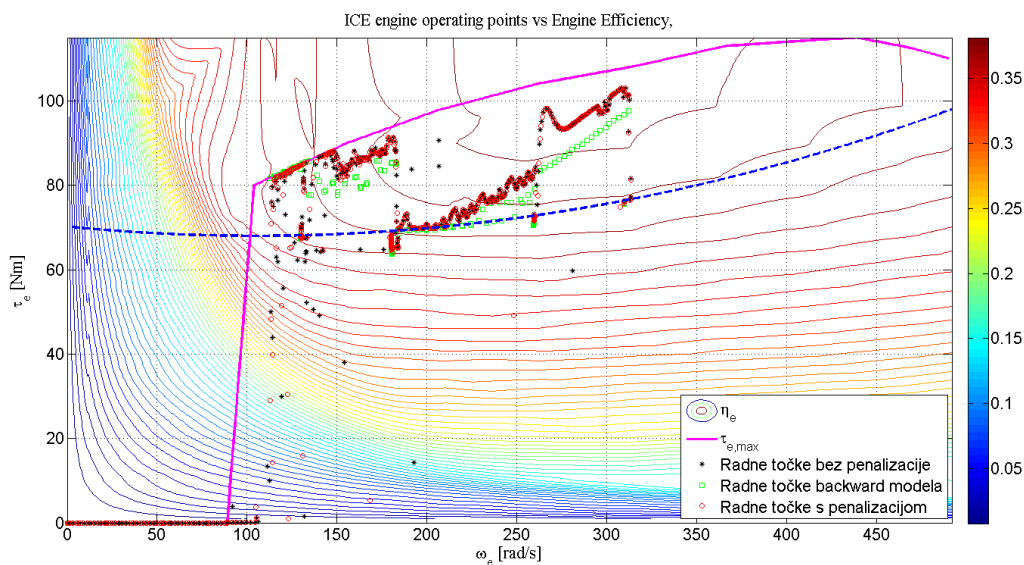
Slika 7.2. Usporedba potrošnje za različite cikluse - ograničeno područje parametra K.

Na temelju danih grafova može se zaključiti da je optimalan izbor parametra $K = 0.2971$ pošto se za tu vrijednost dobiva najniža potrošnja ako se u obzir uzimaju sva tri certifikacijska ciklusa.

7.1. NEDC ciklus



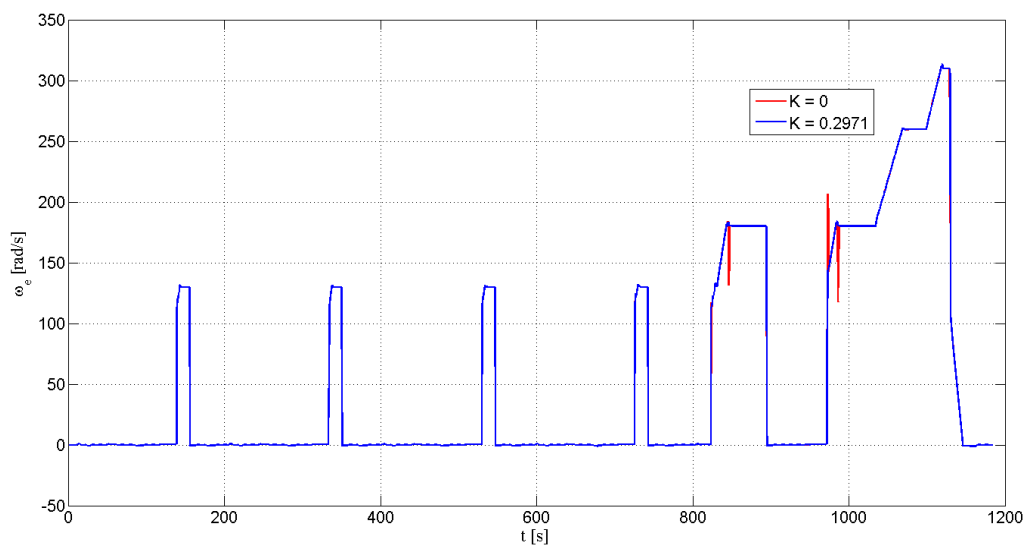
Slika 7.3. Usporedba SoC-a i ukupne potrošnje početne i realne strategije.



Slika 7.4. Radne točke benzinskog motora.

Tablica 7.4. Usporedba početne i realne strategije za NEDC ciklus.

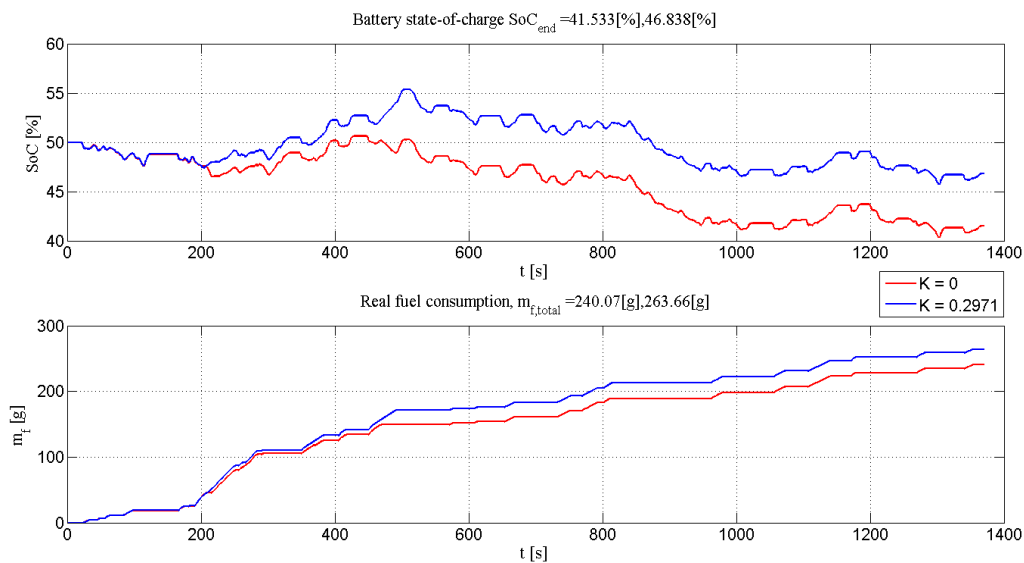
NEDC			
	m_f [g]	SoC [%]	f_2 [%]
RB+ECMS	263.87	50.358	-1.0176 (0.0 %)
Strategija 2 ($K = 0.2971$)	264.99	50.672	-1.0751 (-0.0575 %)



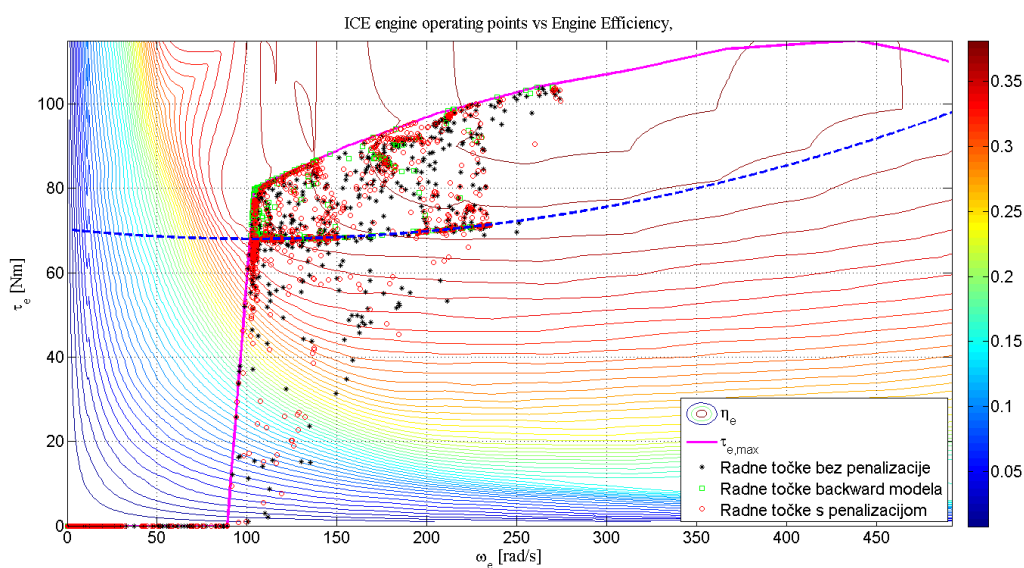
Slika 7.5. Usporedba brzina vrtnji benzinskog motora početne i realne strategije.

Na temelju prikazanih rezultata, može se zaključiti da se primjenjenom strategijom proširenja kriterijske funkcije dobiva “izgladenija“ krivulja brzine vrtnje benzinskog motora, čime se utječe i na kvalitetu vožnje, dolazi do manjih udara brzine vrtnje benzinskog motora, a uz to dobiva se i nešto niža potrošnja goriva. Također, na slici 7.4. primjećuje se kako se radne točke uz primjenjenu strategiju približavaju radnim točkama dobivenim na backward modelu, čemu se i teži.

7.2. UDDS ciklus



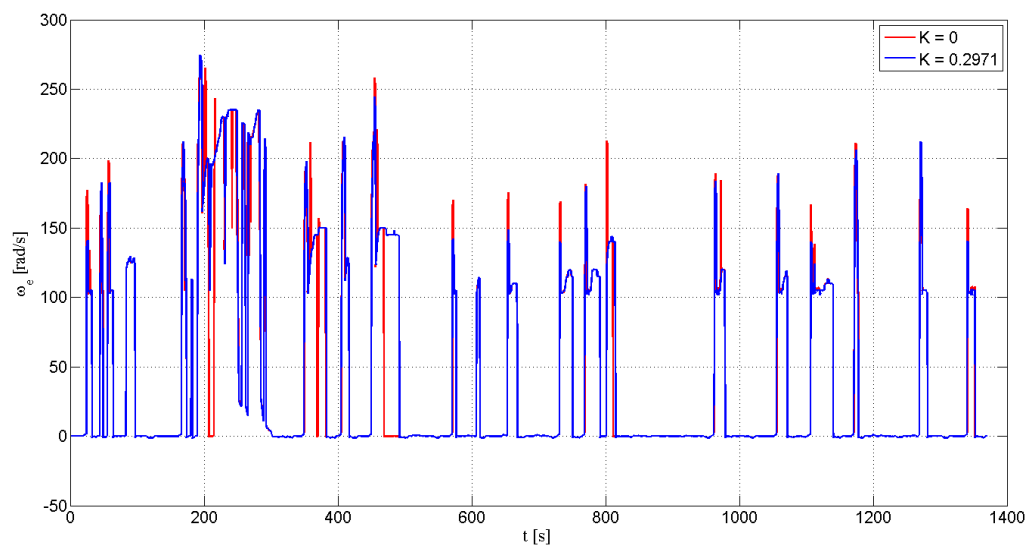
Slika 7.6. Usporedba SoC-a i ukupne potrošnje početne i realne strategije.



Slika 7.7. Radne točke benzinskog motora.

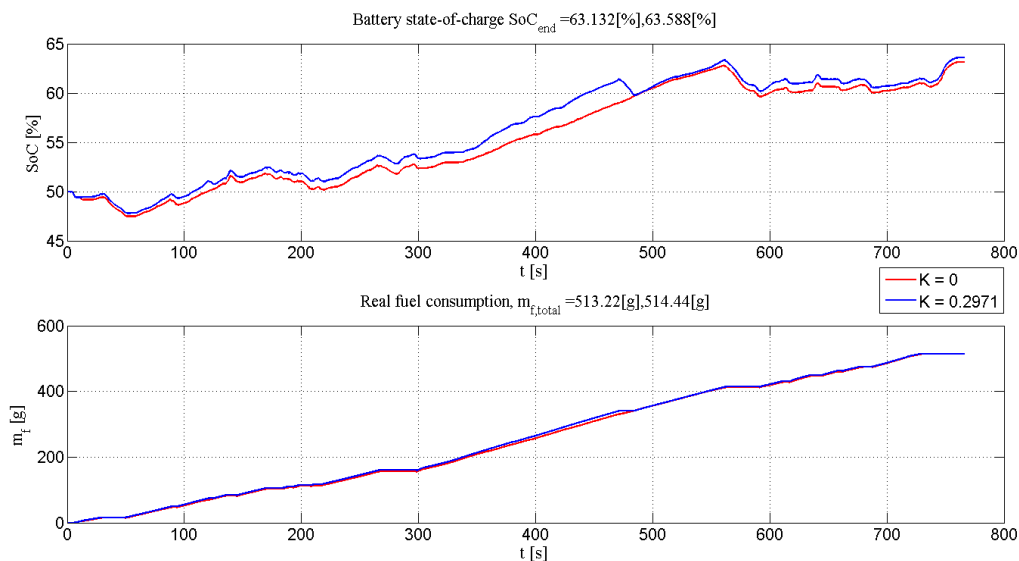
Tablica 7.5. Usporedba početne i realne strategije za UDDS ciklus.

UDDS			
	m_f [g]	SoC [%]	f_2 [%]
RB+ECMS	240.07	41.533	1.4419 (0.0 %)
Strategija 2 ($K = 0.2971$)	263.66	46.838	1.0293 (-0.4126 %)

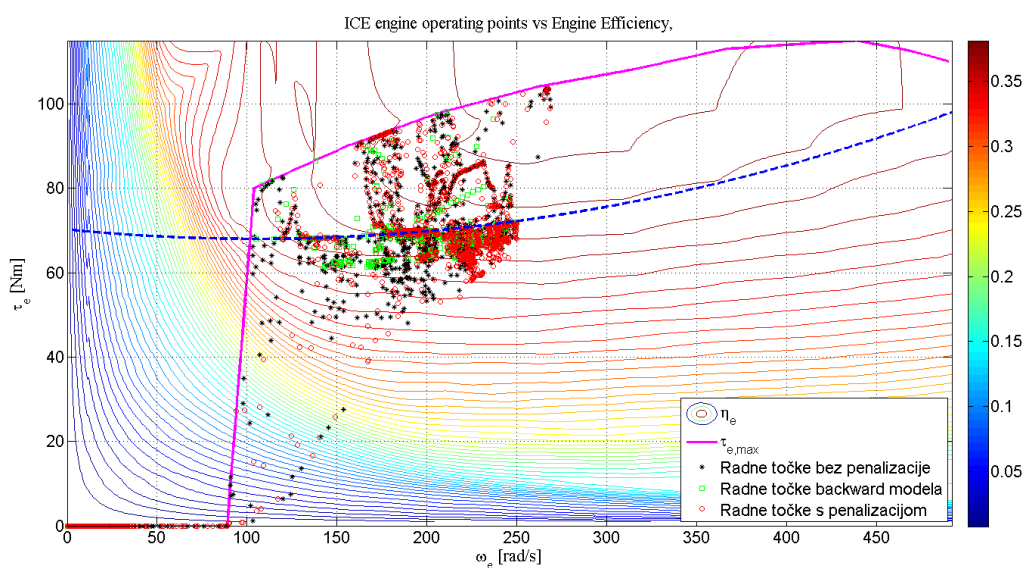


Slika 7.8. Usporedba brzina vrtnji benzinskog motora početne i realne strategije.

7.3. HWFET ciklus



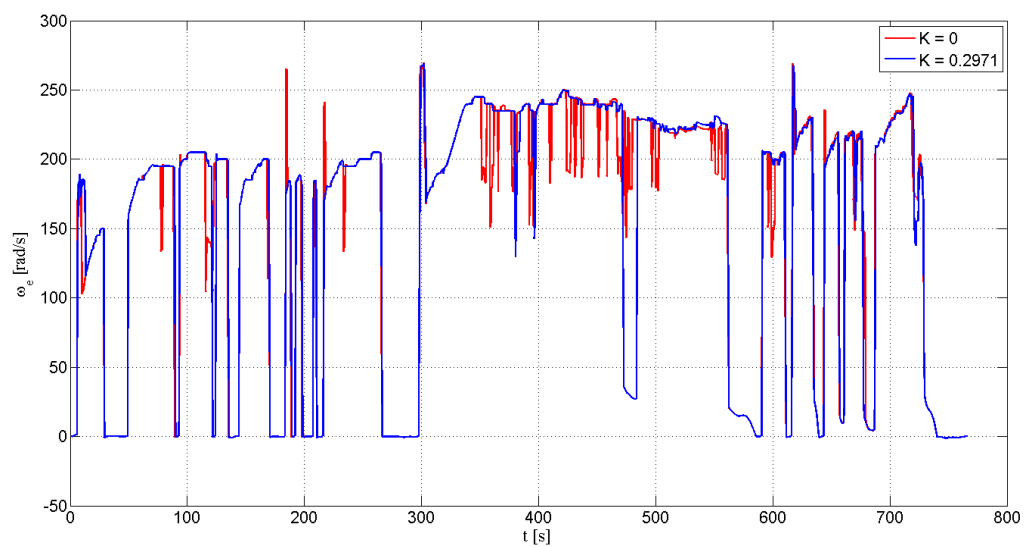
Slika 7.9. Usporedba SoC-a i ukupne potrošnje početne i realne strategije.



Slika 7.10. Radne točke benzinskog motora.

Tablica 7.6. Usporedba početne i realne strategije za HWFET ciklus.

HWFET			
	m_f [g]	SoC [%]	f_2 [%]
RB+ECMS	513.22	63.132	-0.1165 (0.0 %)
Strategija 2 ($K = 0.2971$)	514.44	63.588	-0.2881 (-0.1716 %)



Slika 7.11. Usporedba brzina vrtnji benzinskog motora početne i realne strategije.

8. Zaključak

U radu su analizirane dvije temeljne strategije za smanjenje varijacija upravljačkih varijabli, odnosno za povećanje kvalitete prijelaznih pojava u pogonskom sustavu hibridnog električnog vozila, a samim time i povećanje kvalitete vožnje. Dodavanjem penalizacijskog člana u kriterijsku funkciju algoritma minimizacije ekvivalentne potrošnje goriva prigušuju se varijacije upravljačkih varijabli, što je i potvrđeno putem računalnih simulacija temeljenih na punom dinamičkom modelu pogona. Također je prikazana simulacijska analiza podešenja težinskog faktora penalizacijskog člana, te je pokazano kako se njegovim prikladnim podešenjem dobivaju ne samo smanjene varijacije upravljačkih varijabli, već i smanjena potrošnja goriva i održivija krajnja vrijednost stanja napunjenosti baterije (*SoC*). Simulacije su provedene na tri certifikacijska vozna ciklusa i svaki ciklus pokazuje iste tendencije, pri čemu su spomenuta poboljšanja najizraženija kod ciklusa gradske vožnje (UDDS). Usporedno je analizirana i mogućnost poboljšanja kvalitete prijelaznog procesa primjenom niskopropusnog filtriranja upravljačkih varijabli. Simulacijom je pokazano da i ova strategija daje bolje rezultate u vidu smanjenja oscilacija upravljačkih varijabli, no uštede u vidu smanjene potrošnje su vidno manje nego kod primjene proširene kriterijske funkcije.

Literatura

- [1] M. Cipek, “Usporedba različitih struktura hibridnih vozila“, Zagreb, 2009.
- [2] I. Mahalec, “Zašto hibridna vozila“, Zagreb, 2006.
- [3] J. Deur, M. Cipek, J. Petrić, “Bond Graph Modeling of Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle Power Train Dynamics“, Zagreb, 2012.
- [4] B. Škugor, D. Pavković, and J. Deur, “A Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle Control Strategy Including Instantaneous Optimization of Equivalent Fuel Consumption“, IEEE MSC conference, Dubrovnik, 2012.
- [5] B. Škugor, D. Pavković, J. Deur, “A Series-Parallel HEV Control Strategy Combining SoC Control and Instantaneous Optimisation of Equivalent Fuel Consumption“, Brussels, Belgium, 2012.
- [6] J. Deur, “ Radionica organizirana u okviru istraživačkog projekta i-RESEV “, Zagreb, 2012.

Prilozi

I. CD-R disc